

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

RÉGLEMENTATION ENVIRONNEMENTALE ET DIFFUSION DE L'INNOVATION :  
ÉTUDE DE CAS SYSTÉMIQUE

MÉMOIRE  
PRÉSENTÉ COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN ADMINISTRATION DES AFFAIRES

PAR  
JULIE LAPORTE

JUIN 2009

# UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

Service des bibliothèques

## Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement n°8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

L'accomplissement d'un mémoire de recherche est une aventure. À travers les différentes étapes, le chercheur découvre son sujet, puis la littérature associée. On évolue au cœur même de l'objet d'étude. L'ensemble de ces activités représente plus que l'accomplissement d'un mémoire; c'est la découverte de la recherche universitaire.

Évidemment la réalisation de ce mémoire s'appuie sur la collaboration de nombreuses personnes. C'est pourquoi je tiens à remercier personnellement les gens qui ont participé à cette recherche ainsi qu'au comité d'évaluation de cette étude.

D'abord, j'aimerais souligner le travail de mon encadreur, Monsieur L. Martin Cloutier, professeur au département de Management et Technologie à l'ESG UQAM. Le professeur Cloutier m'a permis de réorienter mon activité de recherche vers ce sujet. Sa rigueur et son professionnalisme ont été une inspiration tout au cours de ma rédaction. La réalisation de cet exercice académique est tributaire du bon encadrement offert par ce professeur.

J'aimerais également faire ressortir l'implication de l'Union des Producteurs Agricoles (UPA) dans cette recherche. Les membres impliqués, ainsi que l'équipe de chercheur ont beaucoup contribué à l'élaboration de l'objet de cette étude. Ils ont notamment agi à titre de conseillers et de facilitateurs tout au cours du processus de recherche. Je les remercie pour leur implication, l'intérêt et la grande disponibilité dont ils ont fait preuve.

Je souhaite également attirer votre attention sur le travail de M. Claude B. Laflamme, co-créateur avec M. Raynald Labrecque, chercheurs au Laboratoire des technologies de l'énergie (LTE) d'Hydro-Québec, du chiffrier MATTEUS. Je tiens à remercier M. Laflamme pour la disponibilité dont il a fait preuve ainsi qu'à la générosité du partage de son savoir.

Je me dois également de mettre en évidence l'implication de divers partenaires rencontrés et contactés tout au long de cette recherche. Notamment, le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP), le Ministère de l'Agriculture, Pêcheries et Alimentation du Québec (MAPAQ), divers centres de recherche ainsi que les consultants en environnement contactés.

Plus près de moi, j'aimerais insister sur le support inconditionnel de mon entourage dans cette aventure. D'abord mon conjoint Philippe qui s'est joint à moi durant la rédaction de ce mémoire. Merci pour ta compréhension, ton amour et ta patience! J'apprends tous les jours à tes côtés. Puis, mes parents, François et Francine, qui m'ont poussé, grâce à leurs encouragements, à passer au second cycle. Merci pour votre support inconditionnel! Vous êtes tous deux une source d'inspiration à plusieurs niveaux. Finalement, j'aimerais saluer mes collègues et amis qui m'ont supporté, aidé et qui ont été à leur tour une source d'inspiration. Merci de m'avoir fait rire!

En conclusion, j'aimerais remercier l'ensemble de mes professeurs universitaires notamment au Baccalauréat M. Charette, M. Desroches et Mme M'Zali qui ont soutenu ma candidature pour le 2<sup>e</sup> cycle, et L'École des Science de la Gestion de l'Université du Québec à Montréal pour avoir offert ce programme de MBA recherche en Management et Technologie.

*Data become information if we know the processes involved. Information can become knowledge if we see the system that is operating. But knowledge only becomes wisdom when we can see how any system must change, and can deal with the reality.*

*(Peter Allen, 1994)*

## RÉSUMÉ

La présente recherche porte sur la valorisation des matières putrescibles. La venue de nouvelles réglementations ainsi que des coûts grandissants liés à la disposition des déchets force le Québec à rechercher de nouvelles solutions durables de valorisation des déchets. Cette étude modélise un système de digestion anaérobie alimenté par des déjections animales, des boues et des matières putrescibles à l'intérieur d'une Municipalité Régionale de Comté (MRC) au Québec.

La problématique de gestion durable des déchets réunit plusieurs niveaux d'acteurs. La problématique étant complexe, cette recherche fournit un cadre théorique qui permet aux acteurs de visualiser le système dans son intégralité et non seulement en tierce partie. La concertation des acteurs est nécessaire à toute forme de collaboration face à une problématique aussi large dont les intérêts respectifs des acteurs sont parfois divergeants.

A la fois qualitative et quantitative, l'approche de recherche fournit des éléments diagnostics, une étude de cas quantitative et appuyée par un modèle de simulation et des recommandations face aux mesures ayant un impact sur l'adoption de la digestion anaérobie. La démarche de recherche s'appuie sur la dynamique des systèmes.

La présente recherche montre que la digestion anaérobie peut s'avérer rentable au Québec. Parmi les trois avenues de valorisation des gaz, la production d'électricité est la moins rentable. Dans le contexte actuel, et en fonction des contraintes relatives à la vente de biogaz et de gaz naturel, la production d'électricité s'avère la meilleure solution afin de faciliter le processus d'adoption de la digestion anaérobie.

Mots clés : Diffusion, Digestion anaérobie, Dynamiques des systèmes,  
Environnement, Matières résiduelles

## AVANT PROPOS

« Les appels à l'aide récents des municipalités pour soutenir financièrement les centres de tri montrent à quel point nous gérons mal les matières résiduelles.

... Deux écoles de pensée se sont toujours affrontées aux sujets du sort qu'il fallait réserver à de tels rebuts. L'école nord-américaine les considère comme des problèmes et des sources de dépenses alors que l'école européenne les utilise comme des ressources naturelles pouvant générer des revenus.

... Depuis 10 ans déjà, les Européens construisent toutes sortes d'usines ajoutant de la valeur aux matières résiduelles. Les eaux usées et les matières putrescibles servent à fabriquer du gaz naturel ou du méthane, de l'éthanol, du méthanol ou du biodiesel qui sont vendus aux filières de chauffage, d'électricité ou de carburant.

... Ce n'est pas un crime que de vouloir transformer les rebuts de notre société en électricité, en produits calorifiques ou énergétiques. C'est plutôt le bon sens même ! Curieux que les élus municipaux d'ici voient toujours le verre d'eau à moitié vide alors que les Européens le voient à moitié plein. » (Bergeron, 2008)

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	III
RÉSUMÉ .....	VII
AVANT PROPOS .....	IX
LISTE DES FIGURES .....	XV
LISTE DES TABLEAUX .....	XVII
LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES .....	XIX
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	9
1.1 INTRODUCTION .....	9
1.2 LA DIFFUSION DE L'INNOVATION .....	9
1.2.1 <i>Modèles de diffusion de l'innovation</i> .....	14
1.2.1.1 Modèle Classique .....	15
1.2.1.2 Le modèle classique : l'innovation .....	15
1.2.1.3 Le modèle classique : canaux de communication .....	16
1.2.1.4 Le modèle classique : le temps .....	18
1.2.1.5 Le modèle classique : le système social .....	20
1.2.2 <i>Études de la diffusion au niveau de l'environnement au Québec</i> .....	24
1.2.2.1 Innovations dans l'élevage porcin au Québec .....	24
1.2.2.2 Adoption de la collecte sélective au Québec .....	27
1.2.2.3 Diffusion de la digestion anaérobie dans le monde .....	28
1.2.3 <i>Sommaire de la diffusion des innovations</i> .....	30
1.3 LA DYNAMIQUE DES SYSTÈMES .....	30
1.3.1 <i>La dynamique des systèmes et la recherche économique-environnementale</i> .....	33
1.3.2 <i>Diagrammes d'influence</i> .....	35
1.3.2.1 Boucles de rétroaction .....	35
1.3.3 <i>Modèle de niveaux et de taux</i> .....	38
1.3.4 <i>Les archétypes des systèmes</i> .....	40
1.3.4.1 Limite à la croissance .....	41
1.3.4.2 Le succès engendre le succès .....	42
1.3.4.3 Les adversaires accidentels .....	43
1.3.5 <i>Application en diffusion de l'innovation</i> .....	44
1.3.6 <i>Synthèse</i> .....	48
1.4 ÉVOLUTION DE LA LÉGISLATION ENVIRONNEMENTALE .....	48
1.4.1 <i>L'effet de serre et les gaz à effet de serre</i> .....	49
1.4.2 <i>Accords environnementaux multilatéraux</i> .....	51
1.4.2.1 Comité de coordination de la couche d'ozone .....	51
1.4.2.2 Protocole de Montréal .....	51
1.4.2.3 Protocole de Kyoto .....	53
1.5 CADRE INTÉGRÉ DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES .....	57
1.6 CONCLUSION .....	57
CHAPITRE II CONTEXTE DE LA RECHERCHE .....	59



2.1	INTRODUCTION .....	59
2.2	LE CONTEXTE LÉGISLATIF .....	59
2.2.1	<i>Politique intégrée des déchets</i> .....	60
2.2.2	<i>La Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008</i> .....	60
2.2.3	<i>Présentation du rapport intérimaire de la politique 1998-2008 du MDDEP</i> .....	65
2.3	CONTEXTE DE RECHERCHE.....	68
2.3.1	<i>Les acteurs</i> .....	68
2.3.2	<i>La production animale</i> .....	68
2.3.2.1	Gestion des déjections.....	69
2.3.2.2	Temps d'arrêt.....	69
2.3.2.3	Le passage à la norme phosphore.....	69
2.3.3	<i>La municipalité régionale de comté</i> .....	70
2.3.4	<i>Les citoyens</i> .....	71
2.4	TERRAIN DE LA RECHERCHE.....	72
2.5	CONCLUSION.....	74
<b>CHAPITRE III MÉTHODE DE RECHERCHE.....</b>		<b>75</b>
3.1	INTRODUCTION .....	75
3.2	CONTEXTE DE LA RECHERCHE.....	75
3.3	APPROCHE DE RECHERCHE.....	77
3.4	PROCESSUS DE RECHERCHE.....	78
3.4.1	<i>Étude préliminaire</i> .....	78
3.4.1.1	Les intrants.....	81
3.4.1.2	Le traitement.....	82
3.4.1.3	Les extrants.....	83
3.4.2	<i>Élaboration du diagramme d'influence (DI)</i> .....	84
3.4.3	<i>Élaboration du modèle de simulation niveaux-taux</i> .....	84
3.4.4	<i>Scénarios de recherche</i> .....	85
3.4.5	<i>Calibrage du modèle</i> .....	85
3.5	ÉVALUATION DU MODÈLE .....	86
3.6	SYNTHÈSE .....	92
<b>CHAPITRE IV ÉLABORATION ET CALIBRAGE DU MODÈLE .....</b>		<b>93</b>
4.1	INTRODUCTION .....	93
4.2	ÉLABORATION DU DIAGRAMME D'INFLUENCE .....	93
4.2.1	<i>Description des boucles</i> .....	95
4.2.2	<i>Boucles de renforcement</i> .....	97
4.2.3	<i>Les boucles d'équilibrage</i> .....	99
4.3	PRÉSENTATION DES VARIABLES DU SYSTÈME.....	102
4.3.1	<i>Les intrants</i> .....	103
4.3.2	<i>Le système de traitement</i> .....	105
4.3.3	<i>Les extrants</i> .....	105
4.4	LE MODÈLE NIVEAUX-TAUX.....	108
4.4.1	<i>Partie I : Les intrants</i> .....	109

4.4.1.1	Le calibrage des intrants .....	109
4.4.1.2	Les déjections .....	110
4.4.1.3	Les matières putrescibles .....	114
4.4.1.4	Les boues .....	117
4.4.2	<i>Partie 2 : La digestion</i> .....	120
4.4.2.1	La capacité du digesteur .....	120
4.4.2.2	La digestion .....	124
4.4.3	<i>Partie 3 : Les extrants</i> .....	126
4.4.3.1	Le compostage .....	126
4.4.3.2	La torchère .....	132
4.4.3.3	Le gaz purifié .....	134
4.4.3.4	Le biogaz .....	136
4.4.3.5	L'électricité .....	137
4.4.4	<i>La partie IV : Les investissements et revenus</i> .....	142
4.5	CALIBRAGE ET ÉVALUATION DU MODÈLE .....	147
4.5.1	<i>Tests d'évaluation</i> .....	148
4.5.1.1	Test des frontières .....	148
4.5.1.2	Évaluation de la structure .....	148
4.5.1.3	Test des conditions extrêmes .....	149
4.5.1.4	Test d'estimation des paramètres .....	149
4.5.2	<i>Évaluation du modèle</i> .....	151
4.6	SCÉNARIOS DE RECHERCHE .....	151
4.6.1	<i>Scénario A - Projet pilote</i> .....	151
4.6.2	<i>Scénario B - Électricité</i> .....	151
4.7	CONCLUSION .....	154
<b>CHAPITRE V DÉMARCHE DE CALCULS EMPIRIQUES.....</b>		<b>155</b>
5.1	INTRODUCTION .....	155
5.1.1	<i>Données : références et consultation d'experts</i> .....	156
5.1.2	<i>Données : MATTEUS</i> .....	157
5.2	LES DONNÉES INITIALES DE MATTEUS .....	159
5.2.1	<i>Les déjections animales</i> .....	159
5.2.2	<i>Les boues</i> .....	164
5.2.2.1	Boues de fosses septiques .....	164
5.2.2.2	Boues d'usines d'épuration .....	164
5.2.2.3	Boues industrielles .....	165
5.2.3	<i>Les matières putrescibles</i> .....	165
5.3	L'APPLICATION DE LA NORME PHOSPHORE .....	168
5.4	CALCULS DES RATIOS POUR LA MODÉLISATION .....	168
5.4.1	<i>Les déjections animales</i> .....	168
5.4.2	<i>Calcul de ratios</i> .....	170
5.6	ÉQUIPEMENTS ET VALEURS NON MODÉLISÉS .....	178
5.7	SYNTHÈSE .....	181
<b>CHAPITRE VI RÉSULTATS DE LA RECHERCHE.....</b>		<b>183</b>
6.1	INTRODUCTION .....	183
6.2	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS .....	185

6.2.1	Tableau des résultats .....	185
6.2.2	Figure d'ajustement de la capacité.....	185
6.2.3	Figures des valeurs Compost et kWh et Valeur biogaz et Gaz naturel .....	186
6.2.4	Figure des flux financiers .....	186
6.2.5	Figure du bilan 2 .....	186
6.3	SCÉNARIOS.....	186
6.3.1	Calibrage de référence : maintien du statu quo (MSQ).....	187
6.4	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS .....	187
6.4.1	Résultats - MSQ .....	187
6.4.2	Résultats - Scénario Projet pilote .....	188
6.4.3	Résultats - Scénario Électricité.....	195
6.5	RETOUR SUR LES QUESTIONS DE RECHERCHE.....	203
6.5.1	Questions de recherche.....	203
6.5.2	Pistes de réflexions .....	210
6.6	DISCUSSIONS,.....	215
6.7	CONCLUSION.....	216
	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>217</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>221</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE DE SITES INTERNETS.....</b>	<b>225</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>229</b>
	<b>ANNEXE 1 - LA DIGESTION ANAÉROBIE .....</b>	<b>231</b>
	<b>ANNEXE 2 - 29 ACTIONS.....</b>	<b>233</b>
	<b>ANNEXE 3 - DICTIONNAIRE DE VARIABLES .....</b>	<b>237</b>
	<b>ANNEXE 4 - MODÈLE NIVEAUX-TAUX .....</b>	<b>245</b>

# LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 - LA VISION GLOBALE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE.....	3
FIGURE 2 - CONTEXTE PROVINCIAL DE LA PRODUCTION DE BIOGAZ (ONTARIO).....	3
FIGURE 3 - L'EFFET DE RÉTROACTION DE RENFORCEMENT .....	12
FIGURE 4 - EXEMPLE DES EFFETS DE RÉTROACTION POSITIF ET NÉGATIF .....	13
FIGURE 5 - CATÉGORISATION DES ADOPTANTS EN FONCTION DE LA VITESSE D'ADOPTION.....	19
FIGURE 6 - COURBE DE DIFFUSION EN « S ».....	20
FIGURE 7 - ÉVOLUTION DE LA COLLECTE SÉLECTIVE AU QUÉBEC, 1994-2004 .....	27
FIGURE 8 - DÉVELOPPEMENT DES CENTRALES DE BIOGAZ À LA FERME EN ALLEMAGNE .....	28
FIGURE 9 - PROGRESSION DES SITES DE DIGESTION ANAÉROBIE AUX É-U .....	29
FIGURE 10 - MODÈLE PRIMITIF DU MONDE .....	33
FIGURE 11 - LA BASE DE L'INFORMATION DANS LA DS .....	35
FIGURE 12 - LES VECTEURS D'UN DI .....	36
FIGURE 13 - EXEMPLE DE DI À DEUX BOUCLES .....	36
FIGURE 14 - REPRÉSENTATION DE L'EFFET DES BOUCLES.....	37
FIGURE 15 - VARIABLE DE NIVEAU ET TAUX : EXEMPLE DE LA BAIGNOIRE.....	39
FIGURE 16 - BUT, OBSERVATION, ÉCART ET ACTION.....	40
FIGURE 17- ARCHÉTYPE : LIMITE À LA CROISSANCE .....	41
FIGURE 18 - ARCHÉTYPE : LE SUCCÈS ENGENDRE LE SUCCÈS .....	42
FIGURE 19 - ARCHÉTYPE : ADVERSAIRES ACCIDENTELS .....	43
FIGURE 20 - LIMITE À LA CROISSANCE : APPLICATION À LA DIFFUSION DE L'INNOVATION .....	45
FIGURE 21 - LE SUCCÈS ENGENDRE LE SUCCÈS : LA DIFFUSION DE L'INNOVATION .....	47
FIGURE 22 - CHANGEMENTS CLIMATIQUES : UN CADRE INTÉGRÉ.....	57
FIGURE 23 - TAUX EFFECTIFS DE RÉCUPÉRATION EN 2000.....	67
FIGURE 24 - MRC DE LA NOUVELLE-BEAUCE ET SES 11 MUNICIPALITÉS.....	73
FIGURE 25 - PHASES DU PROCESSUS DE MODÉLISATION .....	78
FIGURE 26 - ACTEURS ET PHASES DU SYSTÈME.....	79
FIGURE 27 - MODÈLE INITIAL .....	80
FIGURE 28 - LE MODÈLE ÉTOILE DES CARACTÉRISTIQUES DÉSIRABLES D'UN MODÈLE.....	88
FIGURE 29 - DIAGRAMME D'INFLUENCE DU SYSTÈME .....	94
FIGURE 30 - CALIBRAGE DES INTRANTS.....	109
FIGURE 31 - INTRANT 1 : DÉJECTIONS .....	111
FIGURE 32 - INTRANT 2 : MATIÈRES PUTRESCIBLES.....	115
FIGURE 33 - INTRANT 3 : BOUES .....	118
FIGURE 34 - CAPACITÉ DIGESTEUR .....	121
FIGURE 35 - MODÈLE : DIGESTION .....	124
FIGURE 36 - MODÈLE : PROCESSUS DE COMPOSTAGE .....	127
FIGURE 37 - CLARIFICATION.....	128
FIGURE 38 - DÉSHYDRATATION MÉCANIQUE .....	129
FIGURE 39 - DISPOSITION COMPOST.....	130
FIGURE 40 - COMPOSTAGE .....	131
FIGURE 41 - EXTRANTS .....	133
FIGURE 42 - TORCHÈRE .....	133
FIGURE 43 - ENTRANT 1 : GAZ PURIFIÉ.....	134
FIGURE 44 - EXTRANT 2 : BIOGAZ .....	136

FIGURE 45 - ENTRANT 3 : kWh .....	138
FIGURE 46 - CAPACITÉ GÉNÉRATRICE.....	139
FIGURE 47 - INVESTISSEMENTS ET REVENUS.....	143
FIGURE 48 - LES DIGESTEURS DE HUCKABAY RIDGE.....	153
FIGURE 49 - CONCEPTUALISATION DU MODÈLE NIVEAUX-TAUX.....	156
FIGURE 50 - SCÉNARIO A : AJUSTEMENT DE CAPACITÉ .....	190
FIGURE 51 - SCÉNARIO A : VALEUR COMPOST ET kWh .....	191
FIGURE 52 - SCÉNARIO A : BIOGAZ ET GAZ NATUREL .....	192
FIGURE 53 - SCÉNARIO A : FLUX FINANCIERS.....	193
FIGURE 54 - SCÉNARIO A : BILAN 2 .....	194
FIGURE 55 - SCÉNARIO B : AJUSTEMENT DE CAPACITÉ.....	198
FIGURE 56 - SCÉNARIO B : VALEUR COMPOST ET kWh .....	199
FIGURE 57 - SCÉNARIO B : VALEUR BIOGAZ ET GAZ NATUREL .....	200
FIGURE 58 - SCÉNARIO B : FLUX FINANCIERS.....	201
FIGURE 59 - SCÉNARIO B : BILAN 2 .....	202

## LISTE DES TABLEAUX

TABEAU 1 - CARACTÉRISTIQUES DE L'INNOVATION ET EFFETS SUR LA DIFFUSION .....	16
TABEAU 2 - OBJECTIFS DE SEPT PRATIQUES PROPOSÉES EN 1996.....	26
TABEAU 3 - SUBSTANCES VISÉES PAR LE CCNUCC .....	49
TABEAU 4 - OBJECTIFS DE RÉCUPÉRATION À ATTEINDRE D'ICI 2008 .....	63
TABEAU 5 - ÉLÉMENTS CONSTITUTIFS D'UN PGMR.....	64
TABEAU 6 - EFFETS D'APPLICATION DE LA NORME PHOSPHORE .....	70
TABEAU 7 - TABLEAU DESCRIPTIF DES COLLABORATEURS .....	76
TABEAU 8 - LES RÔLES DES COLLABORATEURS .....	86
TABEAU 9 - DESCRIPTIONS DES OBJECTIFS DU MODÈLE .....	87
TABEAU 10 - TESTS DE VALIDATION DU SYSTÈME .....	91
TABEAU 11 - BOUCLES DE RENFORCEMENT I.....	98
TABEAU 12 - BOUCLES DE RENFORCEMENT II .....	99
TABEAU 13 - BOUCLES D'ÉQUILIBRAGE I .....	100
TABEAU 14 - BOUCLES D'ÉQUILIBRAGE II .....	101
TABEAU 15 - BOUCLES D'ÉQUILIBRAGE III.....	102
TABEAU 16 - ÉQUATIONS : CALIBRAGE DES INTRANTS.....	109
TABEAU 17 - ÉQUATIONS DÉJECTIONS.....	111
TABEAU 18 - ÉQUATIONS : MATIÈRES PUTRESCIBLES .....	115
TABEAU 19 - BOUES : ÉQUATIONS .....	118
TABEAU 20 - ÉQUATIONS : CAPACITÉ DIGESTEUR .....	121
TABEAU 21 - ÉQUATIONS : DIGESTION .....	125
TABEAU 22 - ÉQUATIONS : CLARIFICATION .....	128
TABEAU 23 - ÉQUATIONS : DÉSHYDRATATION MÉCANIQUE .....	129
TABEAU 24 - ÉQUATIONS : DISPOSITION COMPOST.....	130
TABEAU 25 - ÉQUATIONS : COMPOSTAGE.....	131
TABEAU 26 - ÉQUATIONS : GAZ .....	135
TABEAU 27 - BIOGAZ : ÉQUATIONS .....	137
TABEAU 28 - ÉQUATIONS : ÉLECTRICITÉ.....	138
TABEAU 29 - ÉQUATIONS : CAPACITÉ GÉNÉRATRICE.....	140
TABEAU 30 - ÉQUATIONS : INVESTISSEMENTS ET REVENUS.....	144
TABEAU 31 - TEST DE CALIBRAGE .....	147
TABEAU 32 - ESTIMATION DES PARAMÈTRES.....	149
TABEAU 33 - COÛTS DES ÉQUIPEMENTS PRÉSENTS ET ABSENTS DU MODÈLE .....	150
TABEAU 34 - CONTRAINTES ET OBJECTIFS DES ACTEURS.....	152
TABEAU 35 - EFFETS DE L'APPLICATION DE LA NORME PHOSPHORE.....	152
TABEAU 36 - CALCUL DES INVENTAIRES POUR LA MRC NOUVELLE-BEAUCE.....	161
TABEAU 37 - INVENTAIRES DE VOLAILLES POUR LA MRC NOUVELLE-BEAUCE.....	162
TABEAU 38 - REGROUPEMENT ET SCISSIONS DE CATÉGORIES D'ANIMAUX.....	163
TABEAU 39 - COMPOSITION DES MATIÈRES RÉSIDUELLES.....	166
TABEAU 40 - CALCULS MATIÈRES PUTRESCIBLES MRC NOUVELLE-BEAUCE .....	167
TABEAU 41 - RÉFÉRENCES POUR CALCULS DES MP MRC NOUVELLE-BEAUCE .....	167
TABEAU 42 - ESTIMATION DES SURPLUS (KG DE $P_2O_5$ ) .....	168
TABEAU 43 - CALCULS DES EFFLUENTS DE DÉJECTIONS .....	169
TABEAU 44 - CALCUL DU FACTEUR BIOGAZ/DIGESTA ET FACTEUR D'AJUSTEMENT.....	170
TABEAU 45 - FACTEUR DE CLARIFICATION ET FACTEUR CORRECTION DENSITÉ.....	171
TABEAU 46 - CALCUL DU FACTEUR DE DÉSHYDRATATION .....	171

TABLEAU 47 - FACTEUR MATIÈRES STRUCTURANTES ET FACTEUR COMPOSTAGE.....	172
TABLEAU 48 - EXEMPLES D'UTILISATION DU BIOGAZ .....	173
TABLEAU 49 - CALCUL DU FACTEUR PERTE PURIFICATION .....	173
TABLEAU 50 - CALCUL FACTEUR CONVERSION J GJ.....	174
TABLEAU 51 - FACTEUR $k_{We}$ / $k_{Wh}$ ET FACTEUR $k_{We}$ D/I .....	174
TABLEAU 52 - DONNÉES SUR LES BOUES .....	175
TABLEAU 53 - CALCULS COÛTS MUNICIPAUX ÉVITÉS .....	176
TABLEAU 54 - TABLEAU D'ÉPANDAGE EN PROPRIÉTÉ ET PAR ENTENTES .....	177
TABLEAU 55 - AUTRES ÉQUIPEMENTS .....	178
TABLEAU 56 - COÛTS D'OPÉRATION ABSENTS DU MODÈLE .....	179
TABLEAU 57 - VALEUR DES PRODUITS.....	179
TABLEAU 58 - RÉSULTATS : SCÉNARIO A .....	189
TABLEAU 59 - RÉSULTATS : SCÉNARIO B .....	197
TABLEAU 60 - PRIX DE VENTE ET COÛTS PRODUCTIONS $\$/kWh$ .....	205

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

BAPE	Bureau d'Audiences Publiques sur l'Environnement
BFS	Boues de fosses septiques
CCNUCC	Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
CCX	<i>Chicago Climate Exchange</i>
CFC	Chlorofluorocarbones
CRD	Construction, Rénovation et Démolition
DD	Développement Durable
DS	Dynamique des Système
DI	Diagramme d'influence
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
ICI	Industriel Commercial et Institutionnel
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, Pêcheries et Alimentation du Québec
MATTEUS	Méthode d'analyse technico-économique de traitement des eaux usées
MDDEP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs
MIS	Management Information et Systèmes
MP	Matière Putrescible
MR	Matière Résiduelle
MRC	Municipalité Régionale de Comté
MSQ	Maintient du statu quo
N-T	Niveaux-Taux
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
PGMR	Plan de Gestion des Matières Résiduelles
PQGMR	Politique Québécoise de Gestion des Matières Résiduelles
PPP	Partenariats public-privé
TIC	Technologie de l'Information et de Communication
UPA	Union des Producteurs Agricoles
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
kWe	Kilowatt électrique
kWh	Kilowatt-heure



## INTRODUCTION

D'hier à aujourd'hui les préoccupations des gens changent. La société d'aujourd'hui tente de résoudre les abus environnementaux du passé pour transmettre à la prochaine génération une partie de ce qui leur a été donné. Les notions de développement durable et d'économie soutenable sont des termes qui se sont ajoutés au vocabulaire sociétal du Québec et d'ailleurs. Alors que les problématiques actuelles au niveau de la pollution de l'air, de l'eau et du sol se multiplient, les actions correctrices se font parfois attendre. Face à ce problème global, en l'absence d'une vision systémique, les acteurs et décideurs sont plongés dans la complexité du problème. Les propositions qui émanent des décideurs sont ainsi limitées à la compréhension statique d'un seul aspect du problème. Certains se penchent sur les coûts alors que d'autres se concentrent uniquement sur la solution à appliquer à l'aspect environnemental en faisant fi des impératifs financiers de la gestion des solutions environnementales. La Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008 est possiblement le reflet d'une vision statique axée sur le résultat, mais qui n'offre pas une vision globale et systémique de l'importance de valoriser les matières résiduelles.

Cette recherche propose de faire l'étude d'une problématique d'adoption technologique qui permet la valorisation des matières résiduelles et la réduction des gaz à effet de serre, par une vision systémique qui intègre divers niveaux d'acteurs. Cette recherche souligne non seulement l'apport de la dynamique des systèmes dans l'étude de problèmes complexes, mais elle génère de l'information pour les décideurs.

Ce chapitre présente la problématique étudiée, les questions de recherche et finalement l'organisation du mémoire.

Parmi les préoccupations environnementales du Québec, cette recherche s'intéresse plus précisément à la mise en valeur des matières résiduelles, la réduction de la contamination environnementale par les fertilisants agricoles et la réduction des gaz à effet de serre.

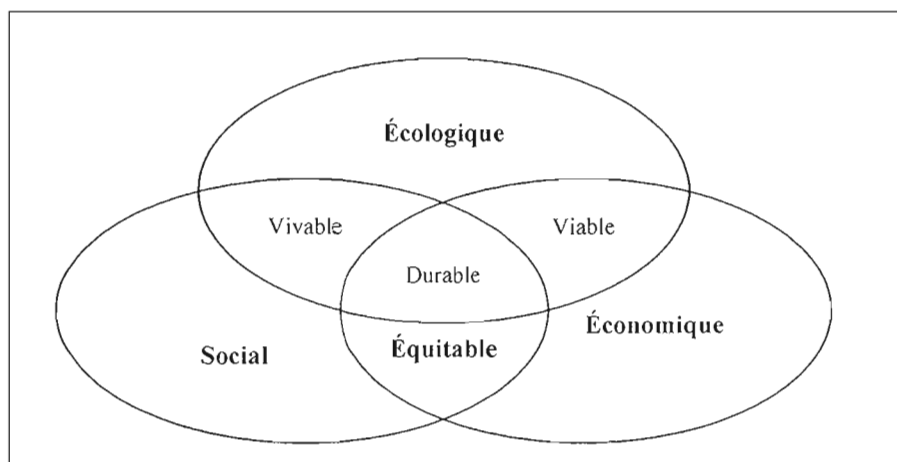
La problématique étudiée est la valorisation des matières résiduelles. L'objet de la recherche regroupe trois niveaux d'acteurs : 1) les producteurs de bestiaux, 2) la municipalité régionale de comté (MRC) et 3) les citoyens. Le contexte entourant chacun de ces acteurs est présenté au chapitre 4.

Les acteurs doivent respectivement valoriser leurs lisiers/fumiers, boues et matières putrescibles. L'innovation qui permet une valorisation économiquement viable est la digestion anaérobie. La raison pour laquelle cette étude cherche une valorisation rentable est que la vision du développement durable ne peut s'enclencher globalement que lorsque celle-ci s'opère à l'intérieur de conditions précises.

Dans l'économie actuelle, la diffusion d'innovations complexes impliquant des groupes d'acteurs aux objectifs parfois divergeants est au cœur de la résolution de problèmes globaux. Cette étude propose d'ailleurs l'étude de l'adoption d'une technologie complexe au sein d'un regroupement d'acteurs dits « *heterophilous* ».

La figure 1 montre l'importance d'une vision systémique pour un cadre de développement durable. La cohésion globale des concepts : écologique, économique, social et équitable illustre l'équilibre fragile dans le domaine. La figure 1 montre cet équilibre décrit par plusieurs dans la littérature portant sur le développement durable.

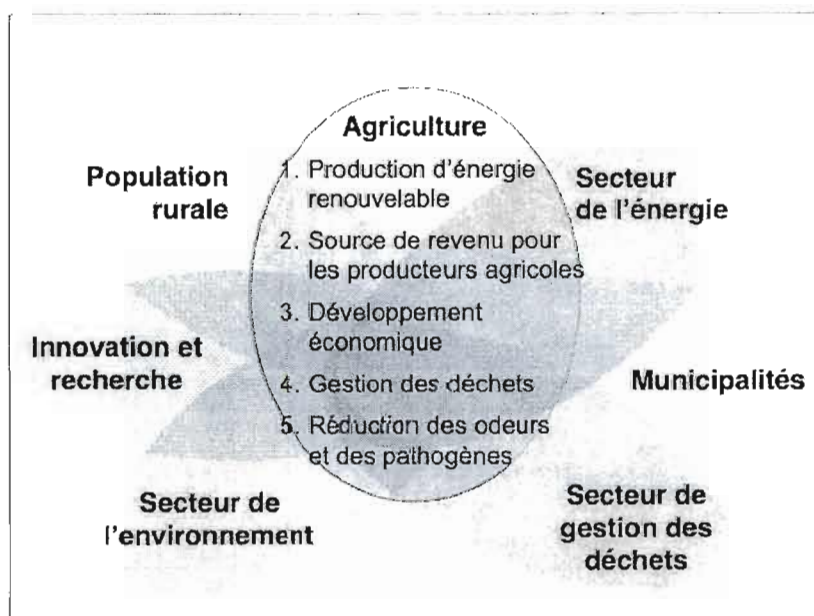
**Figure 1 - La vision globale du développement durable**



Source : (Recyc-Québec, 2008; Brodhag et al. 2003)

La présentation de DeBruyn, Développement du biogaz en Ontario : une vision pour le Québec, montre les interrelations entre l'agriculture et son macro environnement. La « fleur » montrée en gris à la figure 2 vise à représenter le chevauchement des parties prenantes du système étudié dans cette recherche.

**Figure 2 - Contexte provincial de la production de biogaz (Ontario)**



Source : (Agri-Réseau, 2007)

Alors que la digestion anaérobie est une innovation largement répandue en Europe, les chercheurs constatent un certain retard en Amérique du Nord. La diffusion américaine des digesteurs pour stabilisation et production d'énergie est en pleine croissance. De moins de 50 installations en 2000, ce pays en compte plus de 200 en 2007 (USEPA, 2007). À ce niveau, la progression des digesteurs anaérobies au Canada fait bien pâle figure. Il existe en Saskatchewan et en Ontario quelques digesteurs, principalement des installations à la ferme. Ces digesteurs de petites tailles permettent aux propriétaires de réduire leurs coûts d'opération grâce à l'énergie et à la chaleur dégagée du processus de digestion.

Alors que cette technologie possède des avantages théoriques, certains, tels la réduction des gaz à effet de serre (GES), la valorisation des matières résiduelles (MR), et la création d'une énergie verte, comment expliquer la lenteur de son adoption au Canada, mais plus particulièrement au Québec? Cette étude exploratoire quantitative causale propose d'étudier la question sous l'angle des décideurs qui devront se pencher sur de tels projets d'implantation en sols québécois. Elle permet la création d'un historique de recherche sur la question et éventuellement permettrait au Québec de rattraper sa congénère américaine et de réitérer son statut de producteur d'énergie verte dans le monde.

Pour étudier cette question, la recherche propose deux axes de recherches, soit : 1) l'identification des parties prenantes et de leurs intérêts respectifs et 2) l'étude de cas théorique, mais empirique de par la simulation de l'implémentation d'un site de digestion anaérobie au Québec.

Via ces deux axes de recherche, de nouvelles connaissances fourniront des pistes de solutions à cette impasse d'adoption technologique. En effet, l'adoption de la digestion anaérobie au Québec pour la valorisation des déchets est quasi nulle. Cette recherche propose ainsi une analyse systémique des coûts et des bénéfices portant sur l'adoption d'une technologie environnementale. Une portion de cette étude porte sur la viabilité financière de l'adoption de la digestion anaérobie dans une MRC québécoise.

Au niveau de l'élaboration des questions de recherche, il appert d'identifier les acteurs qui évoluent au sein du système. Ces groupes ayant des obligations comme des intérêts respectifs différents, il faut les identifier et étudier si ce phénomène agit sur les relations potentielles entre les acteurs. Ces groupes partagent-ils une problématique commune ou chacun d'entre eux possède-t-il un problème unique. Dans le cas présent, la problématique pourrait être la valorisation des matières résiduelles ou la valorisation d'éléments simples. Quel est le niveau de compréhension de la problématique par les acteurs ? Partagent-ils une vision systémique nécessaire au ralliement des divers groupes dans un processus concerté d'adoption ? Est-ce que les intérêts, la compréhension de la problématique et la vision systémique rendent la collaboration possible entre les acteurs ? L'étude de cas permet de vérifier la rentabilité potentielle d'un projet de digestion anaérobie au Québec. Suivant l'étude de cas, des éléments de solution seront dégagés vis-à-vis les facteurs d'adoption et de non-adoption ainsi que les éléments sensibles d'influencer l'adoption de la digestion anaérobie.

#### 1. Questions principales de recherche

- a. Est-ce qu'un projet de digestion anaérobie peut être rentable au Québec?
- b. Quels sont les facteurs de non-adoption de la digestion anaérobie ?
- c. Quels sont les facteurs clés d'adoption de la digestion anaérobie ?
- d. Comment peut-on influencer l'adoption à l'intérieur du système ?

Au niveau des objectifs de la recherche, la présente étude analyse et décrit les éléments tant qualitatifs que quantitatifs qui entrent en jeu dans l'implémentation d'un système de digestion anaérobie. L'annexe 1 montre les mécanismes de la digestion anaérobie.

La première étape de ce processus consiste à identifier et à présenter les acteurs qui évoluent dans le système étudié. Cette première étape permet d'évaluer non seulement les intérêts particuliers des groupes d'individus, mais aussi leur rôle dans la décision d'adoption et de diffusion. L'étape suivante est la représentation graphique du système puis la modélisation. Via la simulation du modèle, il est possible d'obtenir les résultats quantitatifs de la recherche. La dernière partie de la recherche présente les résultats aux questions de recherche.

Les objectifs de recherche ont été formulés en lien avec les principes qui définissent une recherche de type exploratoire. Dans l'objectif de réalisation d'une étude exploratoire, il est nécessaire, dans un premier temps, pour identifier et présenter les acteurs présents à l'intérieur du système. L'étude de leurs préoccupations respectives ainsi que les contraintes sévissant dans leurs domaines sont également des éléments importants dans la création du portrait du modèle à étudier. Suivant les constatations effectuées lors de la création des portraits des acteurs; on soulève une problématique commune aux acteurs. L'étape suivante requiert de modéliser le système et ses processus. Ces procédures permettent de camper sur papier le modèle et d'illustrer les relations entre les processus présents au cœur du modèle. C'est sur cette base qualitative que l'analyse quantitative utilise de la dynamique des systèmes qui permet des analyses de sensibilité sur le potentiel économique de la technologie, ce qui serait impossible autrement étant donné la complexité dynamique du système. Suivant la modélisation du système et l'étude de scénarios campés sur les questions de recherche, il importe de présenter les résultats ainsi que les conclusions de l'étude. En dernier lieu, cette recherche pourra suggérer des éléments de solutions face à la situation initialement observée.

Les six objectifs de la recherche sont listés ci-après :

- e. Identifier et présenter l'ensemble des acteurs;
- f. Soulever la problématique;
- g. Modéliser le système et ses processus;
- h. Utiliser la dynamique des systèmes;
- i. Présenter les résultats de l'étude;
- j. Suggérer des pistes de solutions.

La présente recherche comporte six chapitres. Le chapitre 1 présente les différents aspects de la littérature liés à 1) la diffusion de l'innovation, 2) la dynamique des systèmes et 3) aux réglementations <sup>9</sup>environnementales qui englobent les activités des trois niveaux d'acteurs étudiés. Le chapitre 2 illustre la méthode de recherche choisie pour atteindre les objectifs de recherche. Le chapitre 3 élabore le contexte de recherche ainsi que le choix du terrain de recherche. L'élaboration et le calibrage du modèle sont expliqués au chapitre 4. Le chapitre 5 présente la démarche de calculs de recherche tandis que le chapitre 6 présente les résultats. La conclusion présente un survol de la recherche, les limites et des nouvelles perspectives de recherches futures.

## CHAPITRE I

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

#### 1.1 Introduction

La revue de la littérature présente les concepts théoriques pertinents à cette recherche en trois sections distinctes. À la section 1.2, est présenté un survol de la littérature relative à la diffusion de l'innovation. Cette section présente le modèle classique de diffusion des innovations et d'autres théories liées à la diffusion. La section 1.3 englobe la dynamique des systèmes, soit le cadre d'analyse retenu dans le cadre de cette recherche. La section 1.4 de la revue de la littérature présente un historique de la question environnementale au niveau de la réduction des gaz à effet de serre, tant au niveau de sources que des puits de carbone.

#### 1.2 La diffusion de l'innovation

Cette section présente les définitions des termes employés dans la littérature pour décrire le phénomène plus global de la diffusion technologique. Alors que la littérature fait mention de diffusion, de dispersion et d'assimilation des technologies, chacun de ces termes possède un sens propre. Certains auteurs regroupent ces définitions. Ainsi, le terme employé par Rogers (2003) pour définir la diffusion regroupe tant la « diffusion planifiée » que la « diffusion spontanée », autrement nommée « dispersion » dans la littérature. Les écrits de Rogers présentent la diffusion tel un processus par lequel l'innovation est communiquée dans le temps, à travers certains canaux, et ce, parmi les membres d'un système social (Rogers, 2003, p. 11).



La définition de « l'assimilation », bien qu'elle sous-entende la définition de la diffusion, se différencie du fait qu'elle se réfère au processus évolutif qui sépare la phase de prise de conscience de l'adoptant envers l'innovation, de la phase potentielle d'adoption formelle et de déploiement généralisé (Fichman, 2000).

L'étude de la diffusion de l'innovation peut prendre diverses formes. On distingue principalement deux types de recherches : les études de modélisation de la diffusion et les études d'adoption (Fichman, 2000). Les études du premier type sont axées sur la détermination du niveau de diffusion, du taux de diffusion, des tendances actuelles ainsi que de l'ampleur du phénomène de diffusion. Les études du second type sont, quant à elles, axées sur la catégorisation des adoptants selon leurs prédispositions face à l'innovation (Mahajan et al., 1990; Mahajan et Peterson, 1985; Parker, 1994).

Alors que l'économie industrielle s'appuyait sur les économies d'échelles, la nouvelle économie de l'information est plutôt orientée sur les économies de réseaux (Shapiro et Varian, 1999). La globalisation actuelle des marchés crée une situation dans laquelle la diffusion de l'innovation est de plus en plus liée aux comportements concertés des acteurs. Chakravorti (2003) observe que dans un monde de connectivité, le changement lié à l'innovation requiert un changement systémique des comportements.

Avec le développement de l'économie de l'information, les chercheurs ont été à même d'observer certaines caractéristiques de ce contexte. La seconde moitié des années 1980 est témoin des premiers écrits en matière de réseau de diffusion. La littérature identifie deux types de réseau. Les réseaux « réels » sont représentés par des connexions matérielles entre les points. C'est le cas d'un réseau téléphonique par exemple. Dans le second cas, celui des réseaux « virtuels », il n'existe pas de liens visibles entre les points (Shapiro et Varian, 1999). Il est possible d'illustrer ce concept en parlant d'une communauté d'utilisateurs; telle la communauté des utilisateurs de l'ordinateur Apple. Les auteurs soulignent que dans le cas des réseaux virtuels, les liens, bien qu'invisibles « jouent un rôle vital dans leur dynamique et les stratégies concurrentielles » (Shapiro et Varian, 1999, p. 157).

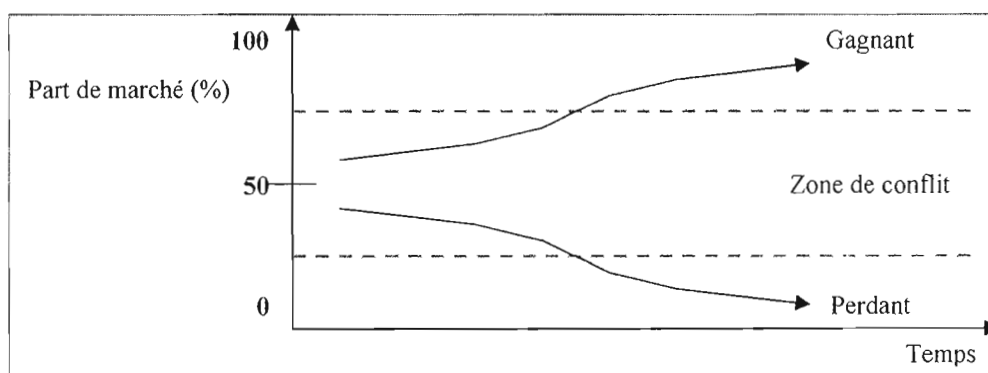
Peu importe la nature du réseau observé, on remarque la présence d'un élément de base. Selon Katz et Shapiro (1985), il existe des produits pour lesquels l'utilité marginale augmente avec le nombre d'agents qui font usage du bien réseau. C'est notamment le cas du télécopieur et de l'Internet. Suite à l'élaboration des théories sur les systèmes et les biens réseaux, les auteurs se sont penchés sur les mécanismes qui les influencent. Dans leurs efforts de commenter le processus de diffusion au sein de réseaux, les chercheurs ont développé des concepts pour expliquer les comportements des sentiers dynamiques d'adoption.

Empruntée des sciences économiques, on retrouve la notion d'externalité de réseau. Ce type d'externalité se définit comme suit : « l'utilité qu'un utilisateur donné tire d'un bien s'accroît avec le nombre des autres agents consommant ce même bien » (Katz et Shapiro, 1985, p. 424; Steyer et Zimmerman, 1998). Au fil des ans, une multiplicité de termes ont fait leur apparition dans la littérature, ainsi on retrouve l'appellation « effet de réseau » et « économie d'échelle liée à la demande ». Alors que Shapiro et Varian (1999), s'accordent pour grouper les trois termes en fonction de synonymes, d'autres auteurs les différencient. C'est le cas de Page et Lopatka (2000) qui reprennent les théories avancées par Liebowitz et Margolis (1994, 1995). Selon ces derniers, Katz et Shapiro (1985) présentent les externalités de réseau sous un seul angle. Basées sur la rationalité économique des acteurs, les deux définitions élaborées par ces auteurs suggèrent l'existence unique d'externalités positives. Or, Liebowitz et Margolis (1994) expriment leurs préoccupations quant au fait que la littérature existante ne présente que les externalités de ce type. Le propos de leur article « *Network externality: An uncommon tragedy* » est d'éclaircir, de raffiner et ultimement de limiter l'utilisation jugée abusive de l'appellation externalité de réseaux (1994). En plus de distinguer l'effet de réseau des externalités de réseau, la typologie présentée par ces auteurs différencie, par ces mêmes termes, les effets positifs des effets négatifs. L'effet de réseau, plus largement répandu dans l'économie « existe lorsque la valeur nette d'une action est affectée par le nombre d'agents qui prennent une action semblable » (Liebowitz et Margolis, 1994, p. 135). Puisque cette définition laisse place tant aux effets positifs que négatifs, ces auteurs ont choisi d'isoler le deuxième type sous une appellation distincte qu'est l'externalité de réseau. Pour ces auteurs, la notion d'externalité de réseau comprend la définition plus large des effets de réseau. Cette définition, basée sur les inefficiences de marché, se distingue de la précédente puisque à

« l'équilibre, elle expose des gains inexploités provenant des échanges en regard de la participation au réseau » (Liebowitz et Margolis, 1994, p. 135). Cette distinction permet aux auteurs d'affirmer que les externalités de réseau représentent des effets de réseaux négatifs. La typologie présentée par ces auteurs n'étant pas universellement répandue, la terminologie de Shapiro et Varian (1999) est celle choisie dans cette étude.

Afin d'expliquer la domination de certaines firmes ou technologies, plus particulièrement au niveau des technologies de l'information et des communications (TIC), Shapiro et Varian (1999) ont cerné un phénomène de basculement où l'effet « *de feedback* » ou de rétroaction de renforcement émerge. Parmi les exemples de basculement les plus couramment cités, on note la guerre de standard entre Beta et VHS et celle de la plateforme Wintel contre Apple (Katz et Shapiro, 1986, 1994; Shapiro et Varian, 1999). La figure 3 montre l'effet de la rétroaction de renforcement au niveau de la capture des parts de marché.

**Figure 3 - L'effet de rétroaction de renforcement**



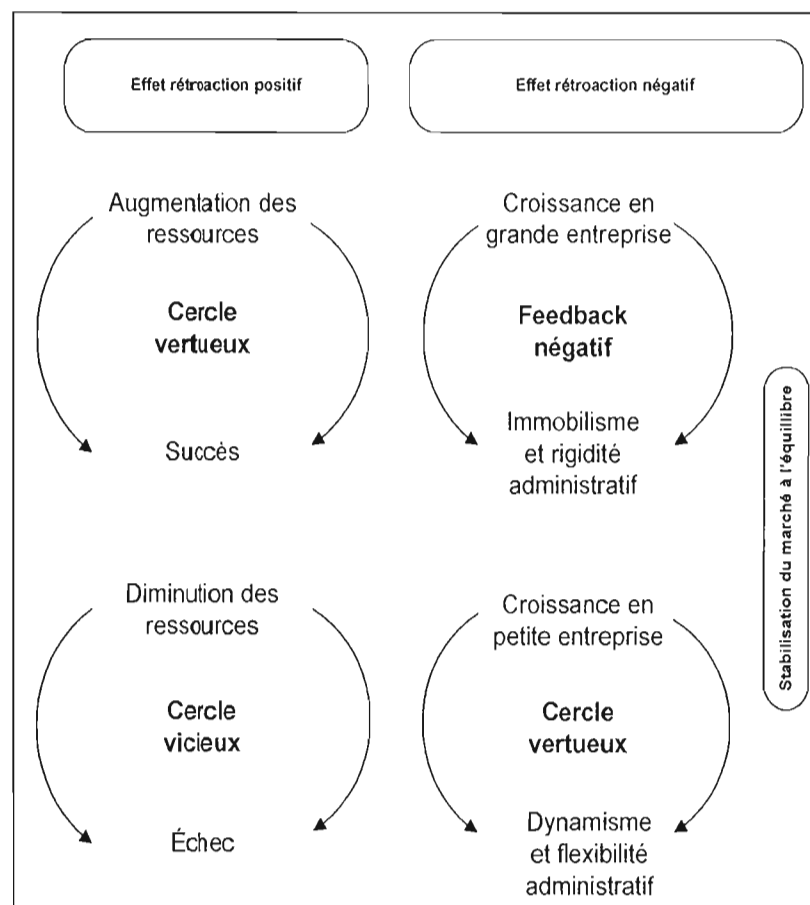
Source : (Shapiro et Varian, 1999)

Dans ces deux cas de figure, l'effet de rétroaction de renforcement a contribué au basculement dont l'histoire est dorénavant témoin. L'effet de rétroaction possède deux dynamiques opposées. Lorsque que l'effet de rétroaction est positif, on assiste au renforcement de la croissance. Les forts se fortifient, alors que les faibles s'affaiblissent (Shapiro et Varian, 1999). L'effet de rétroaction négatif quant à lui induit une dynamique différente. La force engendre la faiblesse et la faiblesse engendre la force (Shapiro et Varian,

1999, p. 158). Il est possible d'illustrer cet effet à l'aide d'un corollaire bien connu de nos organisations; l'effet des coûts de complexité. La figure 4 montre des exemples d'effets de rétroaction positif (renforcement) et négatif (équilibre).

Afin de mieux décrire la rétroaction positive, ou de renforcement, on introduit la notion de cercles « vertueux » et « vicieux ». Comme l'effet de rétroaction de renforcement agit sur la croissance, il en résulte deux issues possibles. La croissance a pour effet de montrer un cercle vertueux alors que la décroissance reflète l'effet du cercle vicieux.

**Figure 4 - Exemple des effets de rétroaction positif et négatif**



### 1.2.1 Modèles de diffusion de l'innovation

Alors que la sociologie et l'anthropologie émergent en tant que nouvelles sciences sociales, les années 1900 sont témoins des premières parutions d'études en Europe portant sur la diffusion des innovations (Katz, 1999; Rogers, 2003). Durant les années 1940 et 1950, les études sur la diffusion se sont multipliées. Elles étaient alors une série indépendante d'enclaves intellectuelles (Rogers, 2003). Individuellement, les chercheurs n'étudiaient qu'un seul type d'innovation (Rogers, 2003). Rogers (2003, p. 39) souligne qu'« alors que la nature distinctive des approches portant sur les études de la diffusion, chacun des groupes ont remarquablement constaté des découvertes similaires; telle la courbe de diffusion en « S » ». Rogers (1962) publie dans la première édition de « *Diffusion of innovations* » un modèle de diffusion générique. Avant les années 1960, les recherches sur la diffusion étaient cloisonnées et en aucun cas ne faisaient référence à d'autres études sur la diffusion. Rogers (1962) insiste sur la conscientisation face aux différentes traditions de recherche. Une tradition de recherche s'établit lorsqu'une série de recherches est menée successivement et que ces dernières sont influencées par les recherches précédentes. Rogers (2003) en dénombre neuf principales : l'anthropologie, sociologie primitive, la sociologie rurale, l'éducation, la santé publique et la sociologie médicale, la communication, le management et le marketing, la géographie et la sociologie générale. Ce sont principalement ces neuf traditions de recherche qui ont fait évoluer la discipline. Au milieu des années 1960, les barrières entre les différentes traditions tombent peu à peu. Pour la première fois, les recherches font référence à d'autres recherches portant sur la diffusion.

Rogers (2003, p. 39), fondateur du modèle classique, considère que le corpus théorique en diffusion émerge sous une forme unique de concepts et des généralisations issue des diverses disciplines scientifiques. D'autres auteurs, tel Fichman (1999), mettent en doute l'universalité des concepts élaborés par Rogers. Celui-ci souligne : « néanmoins, qu'aucune théorie unique en innovation n'existe, et l'émergence d'une semble improbable » (Fichman, 2000, p. 107)

Issus de diverses disciplines, les théories et modèles utilisés dans le cadre de diverses recherches sont applicables dans un cadre qui leur est propre. Ceci explique pourquoi le modèle classique plus largement répandu peut, dans certains cas, être non applicable (Fichman 2000).

«En effet, bien que le modèle classique élaboré par Rogers ait contribué tant à l'élaboration des concepts de base qu'à la terminologie largement présente à l'intérieur de cette discipline, le modèle classique, en reste un dont l'applicabilité peut varier en fonction du type d'innovation et du contexte d'adoption.» (Fichman, 2000, p. 107).

« Le modèle classique étant basé sur des études élaborées principalement sur la diffusion d'innovation simple par des individus; celui-ci s'applique plus difficilement à des technologies plus complexes où la décision d'adoption est liée à un groupe d'individus » (Fichman, 2000, p. 107).

C'est également le cas de l'applicabilité du modèle classique avec la diffusion d'innovation adoptée par des organisations.

#### 1.2.1.1 Modèle Classique

Le modèle classique définit la diffusion tel « un processus par lequel l'innovation est communiquée dans le temps, à travers certains canaux, parmi les membres d'un système social » (Rogers, 2003, p.11). La section suivante présente les quatre pôles théoriques présents dans cette définition.

#### 1.2.1.2 Le modèle classique : l'innovation

Rogers (2003, p. 12) définit l'innovation, telle une idée, une pratique ou un objet qui est perçu comme nouveau pour un individu ou une unité d'adoption. L'innovation dépend de la perception des acteurs. De sorte que, la nouveauté et l'innovation est une référence qui peut sembler arbitraire entre les acteurs. Au niveau de l'innovation, Rogers (2003) répertorie cinq caractéristiques montrées au tableau 1 : 1) l'avantage relatif, 2) la compatibilité, 3) la complexité, 4) la possibilité d'essai et 5) l'observabilité. Le tableau 1 montre les effets sur le

taux de diffusion selon les caractéristiques de l'innovation. L'avantage relatif de la nouvelle technologie illustre la perception de supériorité de l'innovation en fonction de la technologie qui lui précède. La compatibilité, quant à elle, représente le niveau de cohérence et de logique qui lie l'ancienne technologie à la nouvelle. Cette mesure repose sur les valeurs, les expériences passées et les besoins exprimés par les adoptants. La complexité représente le niveau de difficulté et d'utilisation perçu par les adoptants. La possibilité d'essais fait référence au niveau d'essai limité possible de l'innovation par les adoptants. L'observabilité, quant à elle, représente le niveau visibilité de l'innovation face aux adoptants potentiels. Chacune de ces caractéristiques, perçues par les individus, permet aux chercheurs d'expliquer les distinctions observables au niveau du taux d'adoption (Rogers, 2003).

**Tableau 1 - Caractéristiques de l'innovation et effets sur la diffusion**

Caractéristiques de l'innovation	Effets sur le taux de diffusion
Avantage relatif	Positive
Compatibilité	Positive
Complexité	Négative
Possibilité d'essai	Positive
Observabilité	Positive

Source : (Rogers, 2003)

#### 1.2.1.3 Le modèle classique : canaux de communication

Le second élément présent dans la définition de la diffusion est celui des canaux de communication. Le processus par lequel les participants créent et échangent de l'information entre eux, pour atteindre une compréhension mutuelle se nomme « communication ». La diffusion est un type particulier de communication dans laquelle le contenu du message est changé et constitue une idée nouvelle.

Les canaux de communication élémentaires sont constitués de quatre éléments. Il faut d'abord une innovation. Afin de partager celle-ci, le canal nécessite deux acteurs. Un individu ou unité de diffusion qui connaît bien, ou qui a déjà expérimenté l'innovation. Le second, quant à lui, ne possède ni la connaissance, ni l'expérience de cette innovation. Le quatrième élément représente le canal de communication qui permet aux deux acteurs de se rencontrer.

Au niveau de l'étude de la communication entre les personnes, Rogers observe que le transfert d'idées se fait majoritairement entre individus semblables, ou « *homophilous* ». L'« *homophily* » représente le degré selon lequel deux individus ou plus qui interagissent, sont similaires au niveau de certains attributs (Rogers, 2003). Afin d'illustrer le concept d'attribut, l'auteur présente les croyances, l'éducation et le statut socioéconomique. À l'opposé, l'« *heterophily* » définit le degré selon lequel deux individus ou plus, qui sont en interaction sont différents en fonction de divers attributs (Rogers, 2003).

Rogers (2003) souligne que la communication de l'innovation est idéale lorsque les participants sont « *heterophilous* » au niveau de l'innovation, alors qu'ils sont « *homophilous* » au niveau des autres variables. Selon Rogers (2003), la communication « *heterophilous* » entre les individus différents peut causer des dissonances cognitives puisque l'individu se retrouve dans un état psychologique inconfortable étant exposé à un message inconsistant avec ses croyances. Les exemples suivants illustrent la théorie avancée précédemment. La présence d'un agent de changement surqualifié peut rendre la communication sur l'innovation inopérante, dû à un niveau de langage inadéquat; une trop forte « *heterophily* ». Le cas opposé, trop grande « *homophily* », représente une situation où deux personnes possèdent les mêmes informations sur l'innovation et, qu'aucune nouvelle information n'est retirée de l'échange. Ainsi, la nature de la diffusion requiert une présence minimale d'« *heterophily* » entre les participants.

Alors que les réseaux de communication de masse permettent habituellement une communication rapide et efficace, elle sert principalement à conscientiser les utilisateurs potentiels (Rogers, 2003). Les réseaux interpersonnels sont plus efficaces au niveau de la persuasion sur l'acceptation de nouvelles idées; et ce, particulièrement si les personnes qui les



composent sont semblables (Rogers, 2003). Rogers (2003) mentionne que l'avènement de l'Internet a permis de créer un réseau interactif de communication. Ce réseau est particulièrement important dans la diffusion de certains types d'innovation; spécifiquement depuis les récentes décennies (Rogers, 2003).

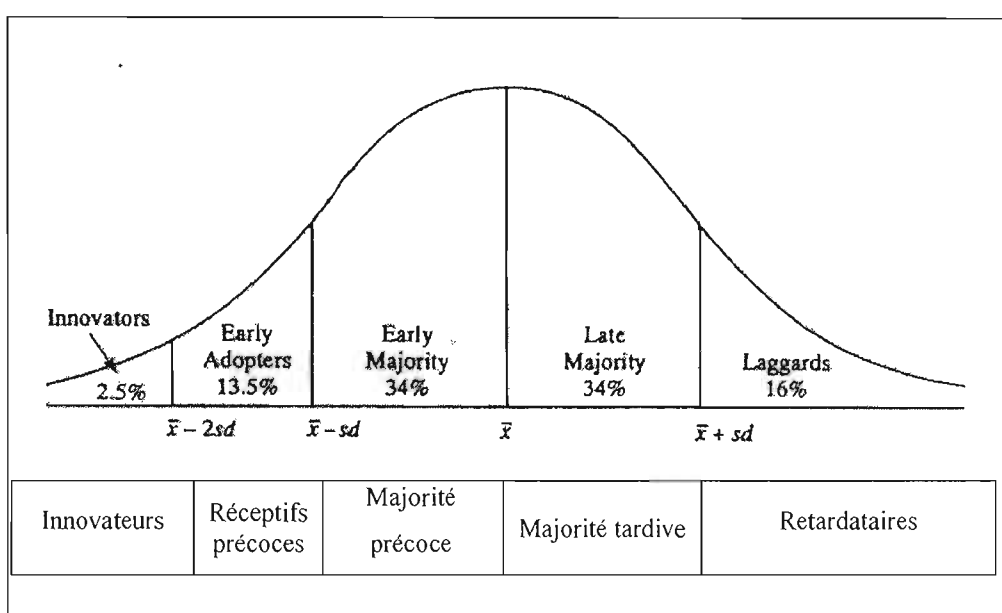
#### 1.2.1.4 Le modèle classique : le temps

Le troisième élément présent dans la définition de la diffusion fait référence au temps. Dans le but de mettre en relation la notion temporelle et la diffusion, Rogers a circonscrit le processus de diffusion. Le processus d'« innovation-décision » représente une quête d'information combinée au traitement de celle-ci, ce qui permet à l'individu de réduire graduellement son niveau d'incertitude face à l'innovation. Ce mécanisme « innovation-décision » se définit en cinq étapes. La première étape, nommée « connaissance », fait référence au stade de prise de conscience de l'existence de l'innovation, et ce, conjointement à une certaine compréhension des fonctions proposées. La seconde étape « persuasion » représente la formation d'une attitude favorable ou défavorable face à l'innovation. L'étape de la décision s'enclenche lorsque l'individu s'engage dans des activités qui le mèneront vers un choix d'adoption ou de rejet. C'est à la quatrième étape « implantation » que l'innovation est mise en oeuvre. Le processus d'« innovation-décision » se termine avec l'étape de « confirmation ». À ce moment, l'individu recherche l'approbation au niveau de l'innovation. Dans le cas où l'individu est confronté à des messages contradictoires au niveau de l'innovation, il peut renverser sa décision d'adoption. Suivant l'adoption, si l'individu choisi de suspendre l'utilisation, on observe alors une « interruption ».

Au plan de l'étude de la diffusion, l'ajout du vecteur temporel permet l'observation de trois types de recherche. Les études de durée d'« innovation-décision » se concentrent sur la mesure du temps nécessaire aux divers individus pour compléter le processus d'adoption. Le second type d'étude concerne la catégorisation des unités d'adoption en fonction de leur vitesse d'adoption, il s'agit du taux (une unité par période de temps). À l'aide de la courbe de fréquences, voir la figure 5, Rogers (2003) classifie les adoptants en cinq catégories. Illustré avec l'aire sous la courbe, ce sont les innovateurs qui forment les premiers 2,5 % d'adoptants.

Suivant le geste des innovateurs, suivent les réceptifs précoces qui représentent 13,5 %. La majorité précoce vient ensuite avec ses 34 %. Ces trois premières catégories représentent 50 % de l'aire sous la courbe. Les deux dernières catégories sont formées respectivement de la majorité tardive 34 % et des retardataires 16 %.

**Figure 5 - Catégorisation des adoptants en fonction de la vitesse d'adoption**



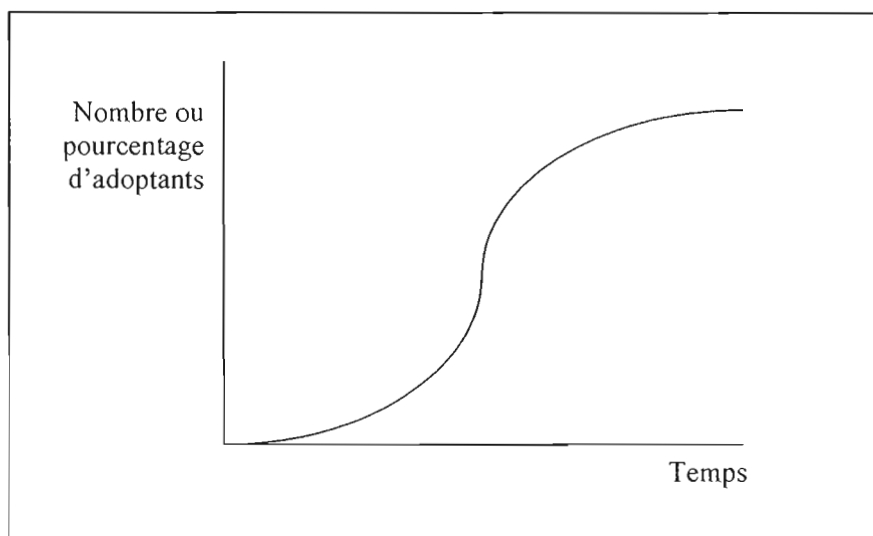
Adapté de : (Rogers, 2003, p. 281)

Le troisième type de variable observable en diffusion est l'étude du niveau d'adoption. On définit ce type d'étude par la vitesse relative avec laquelle une innovation est adoptée par les membres d'un système social (Rogers, 2003). Ce concept est illustré par la courbe de diffusion en « S ».

La figure 6 montre la courbe en « S » typique à la diffusion d'innovation. Utilisée par divers chercheurs à l'intérieur de cette discipline, cette courbe représente la quantité cumulée d'adoptants. Tel que montré à la figure 6, la courbe de diffusion en « S » est caractérisée par trois phases. À l'intérieur du premier tiers, peu de gens adoptent l'innovation et le rythme de diffusion est lent. Dans la seconde phase, le rythme d'adoption s'accélère et croît

graduellement jusqu'à ce que la moitié du système ait adopté l'innovation. La troisième phase se distingue de la précédente du fait que le rythme de croissance de l'adoption s'atténue jusqu'à l'asymptote. Alors, on observe que la totalité du système a adopté l'innovation.

**Figure 6 - Courbe de diffusion en « S »**



(Source : Rogers, 2003, p. 112)

#### 1.2.1.5 Le modèle classique : le système social

Le dernier élément présent dans la définition classique de la diffusion de l'innovation fait référence au système social. Rogers définit ce concept tel : « un ensemble d'unités interreliées, lesquels face à une problématique, vont agir de façon concourante dans l'atteinte d'un objectif commun » (2003, p. 23). Les unités ou les membres d'un système social peuvent être formés de diverses entités. Ainsi, des individus, des groupes informels, ainsi que des organisations ou sous-systèmes peuvent constituer les unités. Le système social représente le territoire dans lequel l'innovation se diffuse. Au niveau de la diffusion, il apparaît que le système social influence la diffusion de l'innovation.

Rogers classe ces influences selon cinq types. La première a pour référent la structure du système social. La structure confère régularité et stabilité aux comportements humains présents dans le système (Rogers, 2003), ce qui permet, à un certain niveau, de prévoir les

comportements. La structure permet également de réduire l'incertitude de par l'information qu'elle représente. Cette structure formelle est communément nommée la structure sociale par l'auteur. Rogers observe également la présence d'un système informel à l'intérieur des réseaux interpersonnels de communication. Ce deuxième type de structure permet de tracer les interactions entre les individus, et ce, selon les circonstances. Rogers définit cette structure de communication comme étant : « des éléments différenciés qui peuvent être identifiés dans un modèle de flux de communication » (2003, p. 24). L'auteur remarque que la création de structure de communication est souvent faite à l'intérieur de groupes dit « *homophilous* ». Ainsi, les structures de communication influencent les acteurs au niveau de l'adoption. L'auteur souligne que peu d'études ont été réalisées sur les effets de la structure sociale ou de communication. Pour cause, Rogers identifie la difficulté principale, qui est de distinguer les comportements individuels, des comportements globaux du système étudié.

Le second type d'influence est regroupé sous l'appellation de normes de systèmes. « Les normes sont des comportements acquis qui servent de guide ou de standard au niveau des comportements à l'intérieur d'un système social » (Rogers, 2003, p. 26). Les normes peuvent constituer des barrières aux changements et *de facto* une résistance à la diffusion de l'innovation. Les normes sont d'origines diverses. Culturelles ou religieuses, elles agissent à plusieurs niveaux. Que se soit dans un environnement local, telle une communauté, ou de façon plus globale telle une nation, les normes influencent les comportements des acteurs.

Le troisième type d'influence regroupe des personnes. Ce sont les leaders d'opinion et les agents de changement. « Le leadership d'opinion représente la capacité d'un individu à influencer les attitudes des autres et/ou à manifester des comportements informels qui agissent dans le même sens selon une certaine fréquence » (Rogers, 2003, p. 27). L'influence via le leadership d'opinion est acquis et maintenu lorsque le leader d'opinion possède les compétences techniques requises, qu'il est socialement accessible et qu'il se soumet aux normes du système.

Rogers souligne que l'ouverture à l'innovation des leaders d'opinion dépend de l'orientation du système social. En présence d'un système social ouvert aux changements, le leader sera plus innovateur. Dans la situation inverse, l'attitude du leader d'opinion est teintée de l'environnement social dans lequel celui-ci évolue. À l'intérieur d'un système social, on remarque la présence de plusieurs leaders d'opinion, de sorte qu'il est possible de rencontrer des positions opposées. Le leader d'opinion est perçu tel un modèle d'innovation. C'est leur position centrale, au milieu du système interpersonnel de communication, qui fait des leaders d'opinion des individus uniques (Rogers, 2003).

L'agent de changement se distingue du leader d'opinion, du fait qu'il influence le processus de décision / innovation en fonction de la direction prônée par l'agent de changement. Ce type d'agent agit à des fins diverses. Il travaille généralement à : « l'adoption de nouvelles idées, mais peut aussi tenter de ralentir la diffusion et ainsi prévenir l'adoption d'innovations indésirables » (Rogers, 2003, p. 27). Il se peut que les agents de changement utilisent les leaders d'opinion présents à l'intérieur du système social pour organiser des activités. Les agents de changement sont hautement qualifiés dans leur domaine, ce qui les rend, de par le statut social et leur niveau d'éducation, souvent « *heterophilous* ». Tel que présenté précédemment, l'« *heterophily* » peut, dans certain cas, constituer une barrière à la diffusion. Afin de contrer l'effet d'une « *heterophily* » trop grande, l'agent de changement fait appel à un auxiliaire (*ou assistant*) qui possède une plus grande « *homophily* » avec le client. Ce duo, agent de changement / auxiliaire, permet ainsi de remplir les conditions de la communication idéale identifiée par Rogers.

Le type d'innovation / décision représente le quatrième type d'influence. Rogers (2003) segmente ce construit en trois portions. La décision d'innovation peut être optionnelle, collective ou d'autorité. Dans le cadre de cette recherche, la décision d'innovation se retrouve tant au niveau collectif que d'autorité. La première se caractérise par une décision d'adoption, ou de rejet, individuel et indépendant d'autres membres du système social. La décision d'innovation collective diffère de la précédente de par son obligation de se soumettre au consensus des membres de la collectivité. La décision d'innovation d'autorité est faite par un petit groupe de personnes qui possède soit un pouvoir, un statut ou une expérience au sein du

système. Les membres du système doivent se soumettre aux décisions ainsi prises. Rogers (2003) précise que la réalité présente un continuum intégrant ces trois types de décisions d'innovation plutôt que trois catégories exclusives seulement. Au niveau de la diffusion de l'innovation post-décision d'innovation, ce sont les décisions d'autorité qui possèdent le taux le plus rapide de diffusion. La diffusion d'innovation suivant la prise de décision collective représente généralement une diffusion plus lente que la décision d'innovation optionnelle. Malgré le fait que la décision d'innovation soit plus rapide, il ne reste pas moins que l'adoption n'est pas assurée. C'est le cas des lois qui sont enfreintes par des contrevenants. Rogers (2003) précise que le type de décision peut être dynamique dans le temps. Cette alternative représente un quatrième type de décision d'innovation. À titre d'exemple, une décision dite optionnelle peut dans le temps devenir une décision d'autorité. C'est notamment le cas du port de la ceinture de sécurité en automobile.

Les conséquences d'innovation représentent le dernier type d'influence à la diffusion. Il est possible d'observer leurs effets tant au niveau individuel que systémique. Rogers (2003) classe ces conséquences en trois catégories. Le premier fait référence à la désirabilité d'une innovation. La nouveauté se qualifie désirable ou bien indésirable selon son niveau de fonctionnement. Le second attribut détermine si les effets sont directs ou indirects. Cela relève de la rapidité avec laquelle les changements apparaissent : soit immédiatement, soit suivant un certain délai. La troisième propriété dépend du degré d'anticipation de celle-ci. Lorsque la présence ou l'absence d'effets est reconnue et intentionnelle, elle est anticipée. Dans le cas contraire, on qualifie les conséquences d'inattendues. Au moment de l'introduction, il se peut que les conséquences attendues désirées, directes et anticipées se manifestent, mais il se peut également que la situation soit tout autre. Il arrive que des conséquences inattendues, indirectes et indésirables apparaissent suite à l'adoption. Il s'avère difficile de considérer l'ensemble des comportements des membres d'un système. La prévision des conséquences d'innovation devient *de facto* un exercice complexe.

En somme, l'adoption et la diffusion est le reflet de l'acquisition volontaire ou non de l'objet d'innovation. À ce titre, notons que la diffusion et l'adoption sont des phénomènes dont l'étude permet de comprendre le comportement des acteurs et les mécanismes qui agissent au cœur de la population étudiée.

La littérature sur la diffusion est assez variée et l'émergence d'une théorie unique est peu probable. Notons que l'influence de Rogers sur la discipline est grande. Or, celui-ci a concentré ses études sur la diffusion d'innovations simples auprès d'individus tels que les maladies, les contraceptifs et les téléphones cellulaires.

### 1.2.2 Études de la diffusion au niveau de l'environnement au Québec

Au sujet de la diffusion d'innovations sur le sujet de l'environnement, notons que la littérature est large. On note les quelques exemples suivants : 1) les innovations réduisant les quantités de phosphore et le volume des déjections de porcs, 2) l'adoption de la collecte sélective et, 3) la diffusion de la digestion anaérobie.

#### 1.2.2.1 Innovations dans l'élevage porcin au Québec

En plus de la protection de l'environnement, le développement urbain en région entraîne de plus en plus de pressions sur les producteurs d'animaux. Cet exercice de cohabitation entraîne la modification des façons de faire pour protéger les milieux naturels et agir comme citoyens responsables d'une communauté.

Parmi les diverses exploitations d'élevage, notons que l'exploitation de porcherie est la production qui crée le plus de tensions entre les acteurs : les producteurs, la municipalité et les résidents. Afin d'inscrire la production porcine dans une vision de développement durable, les producteurs, de concert avec leurs associations, travaillent à l'amélioration des pratiques.

Le Québec est témoin depuis quelques années d'initiatives dont l'objectif est de réduire les externalités liées à leur élevage. Le tableau 7 montre quelques-unes des initiatives des membres de la Fédération des producteurs de porc du Québec (FPPQ) depuis 1998 pour améliorer la cohabitation régionale entre les producteurs et les citoyens. Dans le contexte historique récent, le tableau 2 présente sept pratiques introduites en 1996 qui visaient des améliorations pour 2004.



**Tableau 2 - Objectifs de sept pratiques proposées en 1996**

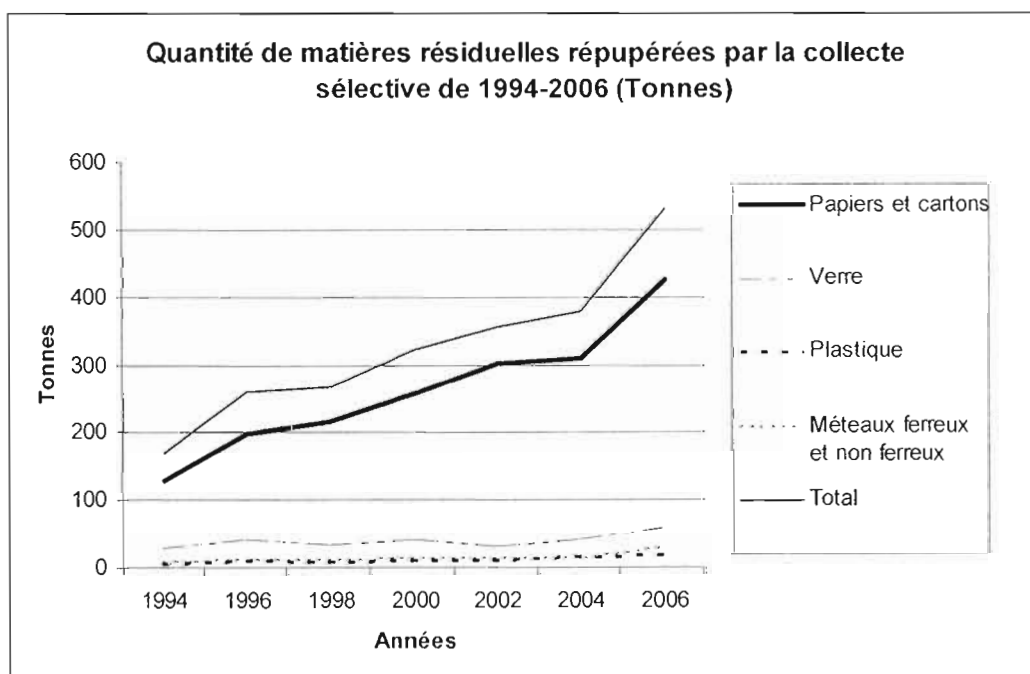
Recommandation	Années de référence		
	1998	2001	2004
Pratique A			
Pratique B			(objectif)
Réduire les volumes de lisier			
Proportion du cheptel abreuvé à l'aide de bols économiseurs et de trémies-abreuvoirs	62 %	73 %	68 %
Proportion des porcs à l'engraissement alimentés avec trois formulations et plus	58 %	67 %	71 %
Améliorer le contrôle des odeurs			
Proportion du volume du lisier épandu par rampe d'épandage	30 %	35 %	58 %
Réduire les charges fertilisantes produites			
Proportion du cheptel nourri avec de la moulée contenant de la phytase	30 %	83 %	72 %
Proportion du cheptel nourri avec de la moulée contenant des acides aminés	11 %	54 %	85 %

Source : (FPPQ, 2004)

### 1.2.2.2 Adoption de la collecte sélective au Québec

Au niveau de l'adoption de la collecte sélective, notons que le Québec s'est donné un objectif de récupération de 65 % des matières recyclables au niveau municipal pour l'an 2008. Le Bilan 2006 de la gestion des matières résiduelles au Québec fait état de l'atteinte du cap des 52 % sur l'objectif initial de 65 % de la PQGMR 1998-2008 (Recyc-Québec, 2007). La figure 7 montre la progression de la récupération de ces matières.

**Figure 7 - Évolution de la collecte sélective au Québec, 1994-2004**

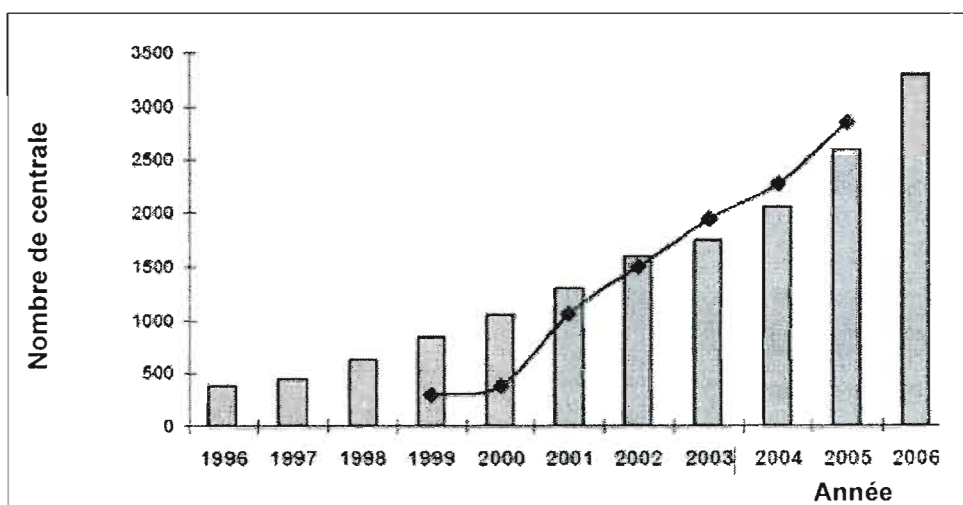


Source : (Recyc-Québec, 2004, 2006)

### 1.2.2.3 Diffusion de la digestion anaérobie dans le monde

La digestion anaérobie est une innovation peu connue au Québec, même si elle est bien établie dans d'autres régions du monde. Les figures 8 et 9 montrent respectivement l'augmentation du nombre d'installations de biogas en Allemagne entre 1996 et 2006 et la production d'électricité provenant de digestion anaérobie en sol américain.

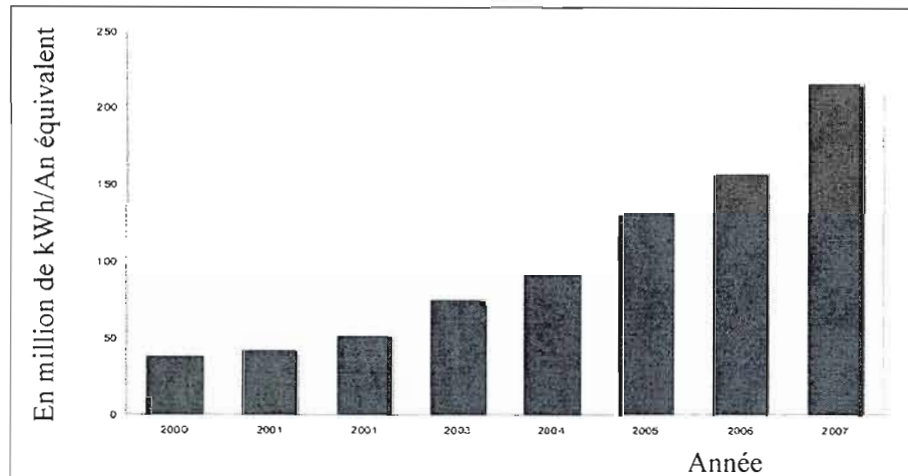
**Figure 8 - Développement des centrales de biogaz à la ferme en Allemagne**



Source : (Agri-Réseau, 2007)

« La construction de digesteurs anaérobies pour la gestion de déjections d'animaux et la production d'électricité s'est substantiellement accélérée dans les dernières années. » (USEPA, 2007). La figure 10 montre en équivalent kWh la production d'énergie.

**Figure 9 - Progression des sites de digestion anaérobie aux É-U**



Source : (USEPA, 2007)

L'article « *Anaerobic digesters continue growth in U.S. livestock market* » souligne cinq facteurs qui agissent positivement sur l'intérêt porté sur la digestion anaérobie (USEPA, 2007) : 1) les améliorations au design des digesteurs, la démonstration de la production des biogaz et la fiabilité des moteurs/génératrices d'électricité, 2) les préoccupations aux niveaux des odeurs et de l'environnement reliées aux effets de la gestion des déjections, 3) l'augmentation des programmes gouvernementaux de partage de coûts, 4) l'intérêt grandissant des utilisateurs dans l'achat d'électricité et de biogaz pour se qualifier aux programmes d'énergies renouvelables et vertes et 5) la vente de crédit carbone potentielle pour générer des revenus. L'article fait également mention que les incitatifs financiers ont eu pour effet d'augmenter le rythme de diffusion des digesteurs anaérobiques dans la gestion des déjections.

### 1.2.3 Sommaire de la diffusion des innovations

En somme, la diffusion d'innovations est présente dans l'ensemble des secteurs étudiés. Notons que la diffusion de la collecte de matières organiques en est à un stade émergent. Selon Recyc-Québec, la récupération des résidus organiques s'élevait entre 6 et 8 % en 2006 (2007). Alors que l'objectif de la PQGMR (1998-2008) fixe un objectif de 60 % de récupération et de valorisation de ce type de matières résiduelles.

### 1.3 La dynamique des systèmes

Dans une économie globale, caractérisée par des pressions constantes sur les coûts et la performance, le temps nécessaire alloué à la réflexion et l'analyse se raréfie (Senge, 2006, p. XV). L'emphase actuelle sur la performance financière a pour effet de complexifier les tâches du gestionnaire. La prise de décision et l'évaluation de projets nécessitent des actions justes et rapides. Ces dernières sont basées non seulement sur les informations disponibles, mais également sur les acquis du décideur. L'humain étant d'une rationalité limitée, il a su se munir d'outils lui permettant d'interpréter la complexité du monde. L'utilisation de modèles et de représentations n'est qu'une illustration de ce besoin de simplifier la réalité pour mieux la comprendre. Herbert Simon (1957) présente, dans son ouvrage *Principe of bounded rationality*, les limites de l'habileté humaine à la prise de décision.

L'auteur souligne que :

« La capacité de l'esprit humain à formuler et résoudre des problèmes complexes est très petite comparativement avec la taille du problème; duquel la solution requiert soit un comportement rationnel objectif dans le monde réel ou bien une approximation raisonnable vers un objectif de rationalité. » (Simon, 1957, p. 198; Sterman, 2000).

Outre la rationalité limitée des décideurs, d'autres facteurs limitent la capacité de prendre des décisions. La présence de cadres mentaux en est un exemple. La DS repose sur ces derniers. Forrester (2000) argumente que la totalité des décisions sont basées sur des modèles, généralement des cadres mentaux (Sterman, 2000, p.16). Au niveau de la DS, le concept de cadre mental affecte plusieurs champs relatifs à la prise de décisions. Sterman (2000) énumère les champs suivants : les croyances portant sur les causes à effets dans le système,

les frontières de celui-ci, l'horizon temporel ainsi que de l'articulation du problème. Il ajoute que, généralement, les individus ne sont pas conscients de la présence des cadres mentaux (Sterman, 2000).

L'exemple de la mesure de la couche d'ozone par la NASA est parlant des effets pernicioeux des cadres mentaux. Les premiers écrits portant sur l'effet des chlorofluorocarbones (CFC) sur la diminution de la couche d'ozone ont été diffusés en 1974. Alors que la communauté scientifique reste sceptique à l'idée, le statu quo sur les CFC est maintenu. C'est en 1985, que la première publication fait preuve de l'existence d'un trou dans la couche d'ozone. Les scientifiques de la NASA se penchent, alors, sur l'historique des données du niveau d'ozone. Les données longitudinales de l'agence n'indiquent pas de trou dans la couche d'ozone. Suivant un examen du système informatique, les scientifiques ont découvert que celui-ci avait été configuré pour rejeter les lectures d'ozone trop basses; et ce, suivant une hypothèse que de tels taux provenaient d'un instrument de mesure déficient. Les données originales démontraient bel et bien sept années consécutives de diminution des taux d'ozone et finalement un trou à cet endroit.

Au niveau de la prise de décision, on remarque que la complexité est de deux ordres, soit : la complexité de détail et la complexité dynamique. La complexité de détail est caractérisée soit par des objets complexes, soit par un grand volume d'objets. La complexité dynamique, est quant à elle, liée à la compréhension des multiples interrelations qui sont présentes dans les systèmes étudiés. C'est précisément dans ce second cas que l'utilisation de la simulation permet de capter la complexité des systèmes dans le temps et d'en extrapoler les comportements sur un horizon temporel.

Face à la complexité grandissante au sein d'organisations, un nouveau champ d'études fait son apparition. Il s'agit de la dynamique des systèmes. J. W. Forrester fonde cette discipline en 1956. Suite à deux années d'élaboration et de développement, il publie dans le *Harvard Business Review* l'article « *A major breakthrough for decision makers* ». Combinant la théorie des systèmes et la simulation assistée par ordinateur, ce champ d'études s'adapte à divers types de systèmes : naturels, humains et techniques (Forrester, 2000).

La dynamique des systèmes (DS) traite de l'influence de la structure et de ses flux d'informations sur le comportement du système ; contrôlant ainsi croissance, stabilité, déperissement, succès et échec (Forrester, 2000, p. 3). L'étude de boucles de rétroaction présentes dans le système permet d'illustrer les changements s'opérant à l'intérieur de celui-ci. Suivant une compréhension accrue du comportement du système, il devient possible de le remodeler afin d'en améliorer la conduite.

La dynamique des systèmes repose sur deux aspects de l'analyse : le diagramme d'influence et le modèle niveaux-taux. La conception de diagrammes d'influences (DI) représente la portion qualitative liée à la méthode. La seconde partie, quantitative, réside dans la création de modèle de simulation niveaux-taux par ordinateur. Cette analyse des systèmes ne pourrait être possible sans une compréhension explicite de l'objet de recherche.

L'avènement des ordinateurs dans les années 1940 a permis l'exécution de calculs complexes. L'E.N.I.A.C. représente bien cet outil de calcul commandé par l'armée américaine. Cette machine effectuait des calculs balistiques qui nécessitaient près de 200 personnes auparavant. Ces ordinateurs ont permis le traitement plus rapide de calculs complexes liés à la complexité statique.

Suite à la popularisation de l'Internet et à l'introduction des bases de données, le rôle de l'ordinateur s'est transformé. Il est passé d'outil de travail à système de référence. Les entreprises se sont munies de département de management de l'information et de systèmes (MIS). Durant cette période, l'information étant la clé du succès, les départements de MIS se mirent à produire une quantité d'information importante. Or, le traitement de ces excès de données, indices et ratios est long et complexe. Il est ardu pour le gestionnaire de concentrer cette abondance de données pour diviser l'utile de l'inutile afin d'accomplir son rôle de décideur.

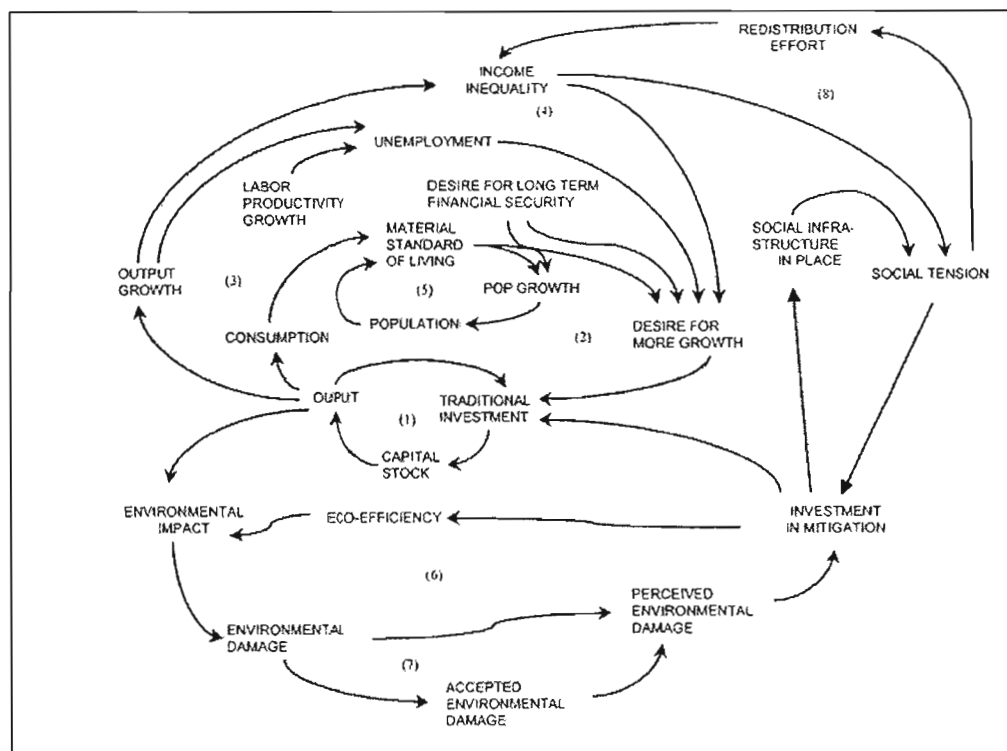
Comme le monde de la gestion est caractérisé par une complexité dynamique grandissante, l'utilisation d'outils d'aide à la décision est suggérée. Les interrelations entre les variables sont au-delà de la compréhension humaine sans appui technologique d'aide à la décision.

Avec l'intelligence d'affaires, il est aujourd'hui possible d'utiliser des outils d'aide à la décision. Les systèmes de simulation permettent de mieux comprendre les systèmes complexes et ainsi, prendre des décisions plus éclairées. Les sections suivantes présentent les éléments constitutifs de la dynamique des systèmes.

### 1.3.1 La dynamique des systèmes et la recherche éconómico-environnementale

Notons que l'analyse de problématiques environnementales n'est pas étrangère à la DS. Au début des années 1970, Forrester (2000) présentait au Club de Rome en 1972 sa modélisation du monde. Il y présente la notion d'équilibre qui deviendra plus tard le concept de développement durable (DD) avec la commission Brundtland de 1987. Inspiré des premiers modèles élaborés par Forrester, Randers (2000) présente, dans *Limits to Growth to Sustainable Development*, les principales boucles qui composent le modèle original. De plus, il actualise les termes utilisés par Forrester. La figure 10 montre le DI de ce modèle.

Figure 10 - Modèle primitif du monde



Source : (Randers, 2000, p. 217)



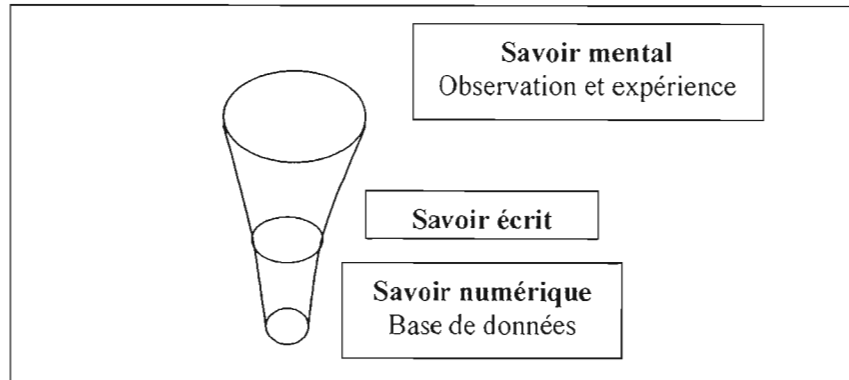
Alors que les résultats de Forrester (2000) suggèrent la stabilisation de la population et de la production physique à des niveaux cohérents avec la capacité environnementale limitée de la planète Terre (Randers, 2000), l'audience présente ne partage pas le même avis. Les membres ne virent « aucun signe probant en faveur d'un changement fondamental dans l'éthique du développement qui avait propulsé des cendres le monde industriel post Seconde Guerre mondiale à la société fleurissante de 1970 » (Randers, 2000, p. 213). Les trois dernières décennies prouvèrent le contraire.

« L'histoire a montré que la croissance physique est effectivement envahissante, que cela prend des décennies pour connaître les externalités (environnementale et sociale) inattendues de la croissance physique, que la présence d'immenses délais influe sur la reconnaissance, la définition et la législation entourant le problème » (Randers, 2000, p. 214).

Selon Randers (2000), la parution de *World Dynamics Book* (Forrester, 1971) définit la problématique de la croissance insoutenable, quelques-unes de ces conséquences et présentait les éléments fondamentaux d'une solution.

Dans la communauté de la DS, notons les travaux de Saeed (1996) qui, depuis une vingtaine d'années, portent sur le développement durable. Dans son article « *Sustainable development : Old conundrums, new discord* », l'auteur explique que les données proviennent de trois ordres : 1) le savoir numérique, 2) le savoir écrit et le 3) le savoir mental (Saeed, 1996; Forrester, 1991). La figure 11 les présente. L'auteur note que les différentes catégories de données renferment des contradictions qui constituent non seulement un défi, mais elles créent des opportunités substantielles d'apprentissage (Saeed, 1996, p. 61). L'intégration de ces données au modèle et la résolution des contradictions est une habileté importante au niveau de la DS (Saeed, 1996).

**Figure 11 - La base de l'information dans la DS**



Sources : Saeed (2000, p. 6); Forrester (1980)

### 1.3.2 Diagrammes d'influence

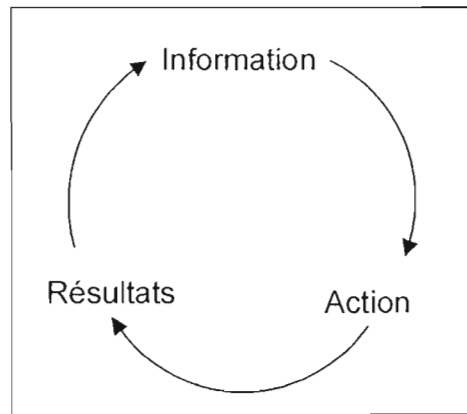
Les DI servent à illustrer le comportement d'un système. La création de ces représentations rend possible la modélisation assistée par ordinateur. Elle permet également, chez l'utilisateur, une prise de conscience envers les effets inattendus et les délais dans la mise en application de solutions. Dans l'objectif de représenter un système, il faut d'abord en délimiter des frontières propres. Cette première étape consiste à définir les frontières du système et de son environnement.

Étant donné que les DI sont formés de boucles de rétroaction, ceux-ci sont de tailles variables. C'est en fonction de l'objet d'étude que la dimension totale du système est déterminée, et ce, selon la pertinence des éléments qui le compose. Tout DI est composé d'une ou de plusieurs boucles de rétroaction. Les systèmes dits complexes sont issus de multiples boucles. La figure suivante présente un système simple à une boucle.

#### 1.3.2.1 Boucles de rétroaction

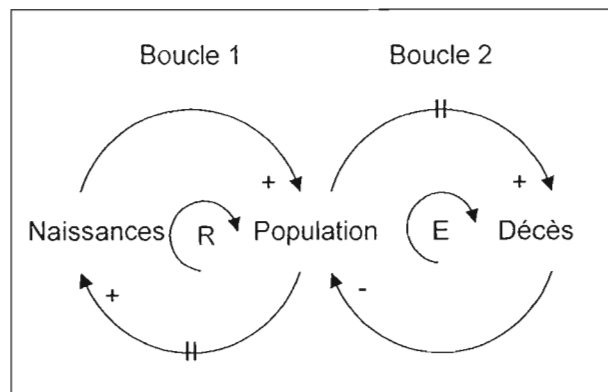
L'approche de la DS possède une typologie définie, ainsi il est possible de représenter une multitude de situations à l'intérieur de modèles simples. Chacune des flèches de la figure 12 se nomme vecteur. Ce sont les éléments de base de la création d'un DI.

Figure 12 - Les vecteurs d'un DI



Chaque vecteur illustre une influence positive ou négative selon la direction entre la cause et l'effet. Un vecteur positif (cause à effet) agit dans le même sens. Le vecteur négatif, quant à lui, affecte dans le sens opposé. Afin d'illustrer ces deux situations, comparons les deux exemples suivants. Dans la figure 13, la boucle 1 représente l'influence de la population sur le taux de naissance. La seconde boucle représente l'influence de la population sur le taux de décès.

Figure 13 - Exemple de DI à deux boucles

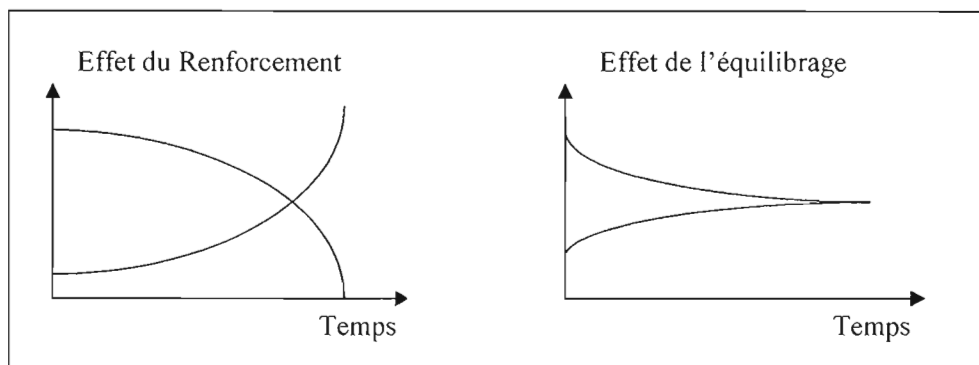


Dans l'exemple de la figure 14, le taux de natalité affecte positivement la population totale. Ce même effet positif est observable entre le niveau de la population et le nombre de naissances; mais également entre le niveau de population et *de facto* le nombre de décès. Là

où il est possible d'observer un effet opposé (vecteur négatif), c'est entre la variable nombre de décès et le niveau de la population. On note que ce dernier possède deux barres parallèles au centre; elles signifient la présence d'un délai entre la variable décès et celle de la population. Ces boucles forment un DI à deux boucles.

Les boucles de rétroaction peuvent engendrer deux dynamiques : renforcement et équilibrage. On distingue celles-ci par la présence de flèches courbées « R » et « E » situées au centre de chacune des boucles. La boucle 1 de l'exemple précédent appartient aux boucles dites de renforcement. Elle représente un phénomène d'amplification. La seconde boucle illustrée à la figure 13 est une boucle d'équilibrage. Ce second cas représente une situation homéostatique. La figure 14 montre les différentes dynamiques relatives au deux types de boucles.

**Figure 14 - Représentation de l'effet des boucles**



(Source : Cloutier, 2006)

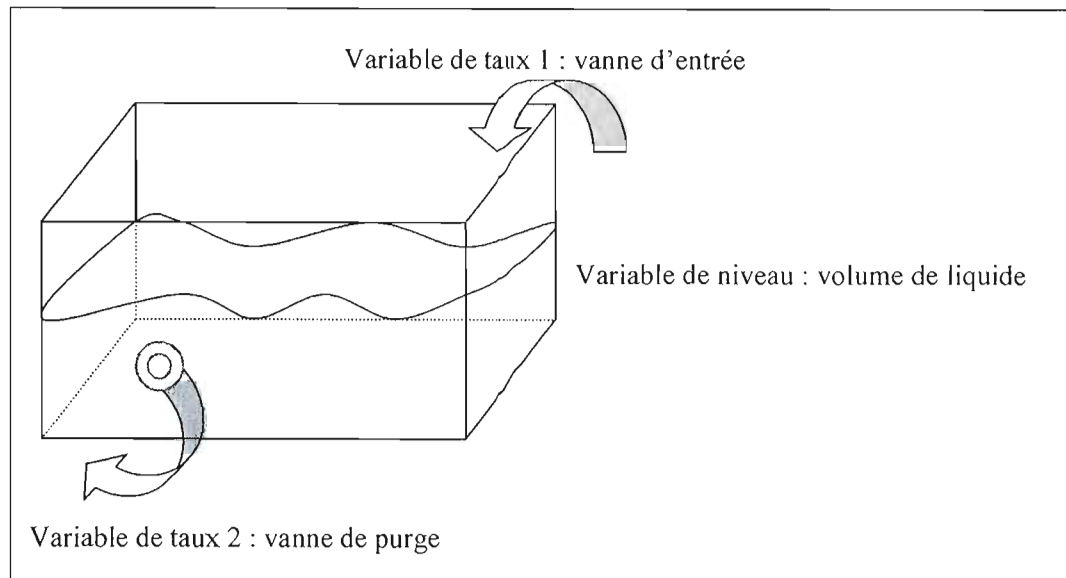
Il est possible de déterminer la nature des boucles selon les règles suivantes. Une boucle formée uniquement de vecteurs positifs est nécessairement une boucle de renforcement. C'est également le cas, lorsque la boucle possède un nombre pair de vecteurs négatifs. En présence d'un nombre impair de vecteurs négatifs, la boucle est de type équilibrage.

### 1.3.3 Modèle de niveaux et de taux

La DS repose sur deux niveaux d'analyse. La création de DI représente la portion qualitative de la méthode. Or, l'objectif de simulation nécessite quant à lui l'utilisation d'une approche quantitative. L'élaboration du modèle de simulation, niveaux-taux nécessite non seulement la représentation des DI dans un logiciel approprié, mais aussi l'ajout d'informations conditionnelles au fonctionnement du modèle de simulation. Ces variables indispensables sont de deux ordres : niveau et taux.

Ces variables constituent le cœur de toute activité de gestion. Que se soit au niveau de la gestion de stock tangibles que des compétences, la maîtrise de ces deux facteurs constitue le travail de base du gestionnaire. Néanmoins, les recherches montrent que « la compréhension intuitive des niveaux et des taux est faible » (Sterman, 2001, p.14). Plusieurs auteurs présentent l'exemple de la baignoire pour illustrer ce point. Supposons qu'une baignoire soit représentée devant vous, cette baignoire représente la variable de niveau puisqu'elle est témoin de l'accumulation et de l'écoulement de son contenu. Ajoutons maintenant deux variables de taux : soit une vanne d'entrée et une autre de purge. La figure 15 illustre cet exemple. Alors que le débit d'entrée est différent de celui de la sortie, il devient difficile de juger de la quantité de liquide présente dans la baignoire. Cet exemple, bien qu'à première vue simpliste, rappelle la capacité limitée de tenir compte de multiples facteurs. Évidemment, cet exemple ne représente en rien la complexité relative présente au cœur des organisations d'aujourd'hui, mais démontre la nécessité de l'utilisation de modèles de simulation pour appuyer le processus décisionnel.

**Figure 15 - Variable de niveau et taux : exemple de la baignoire**

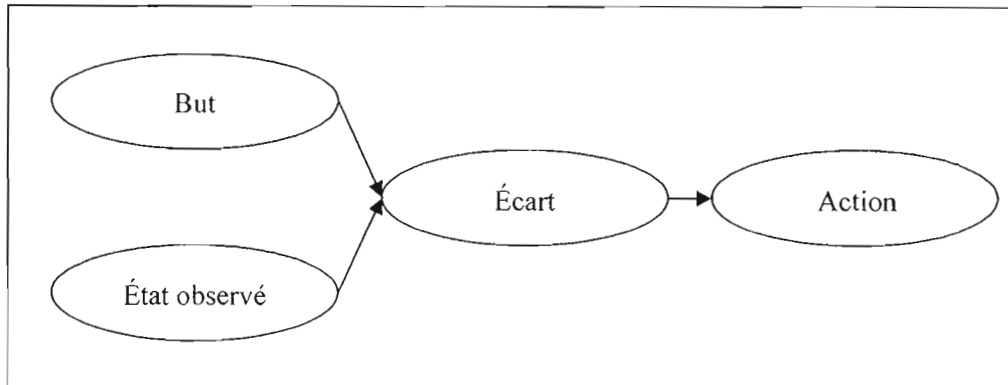


(Source : Cloutier, 2006)

Les variables de niveau représentent l'état du système. Tels des entrepôts, ils sont témoins d'accumulation et de diminution de l'inventaire. Tant matériel qu'immatériel, le niveau de ces informations est représenté à chaque instant au temps « t ». Le niveau observé est déterminé par les flux qui affectent la variable de niveaux. Puisqu'elle accumule les résultats des actions passées, les variables de niveaux ne changent pas instantanément. Elles peuvent posséder des délais.

Ce second type de variable représente les flux. « Les flux sont les variations dans les différents niveaux du système » (Provitolo, 2006, p. 1). Chaque flux représente une vanne qui contrôle le débit d'entrée ou de sortie. À la manière d'un centre de décision, les vannes gèrent les informations et agissent en conséquence. La figure 16 de Cloutier (2006) illustre la pensée de Provitolo.

**Figure 16 - But, observation, écart et action**



(Source : Cloutier, 2006)

Alors que la majorité de la littérature portant sur la DS ne présente que les variables de niveaux et de taux, Provitolo en distingue une troisième; les variables auxiliaires. Présentes dans le canal d'information, ces variables peuvent être des constantes, ou des fonctions (Provitolo, 2006). « Ces variables auxiliaires sont très utiles pour intégrer l'information quantitative et des délais dans les modèles » (Provitolo, 2006, p. 1).

#### 1.3.4 Les archétypes des systèmes

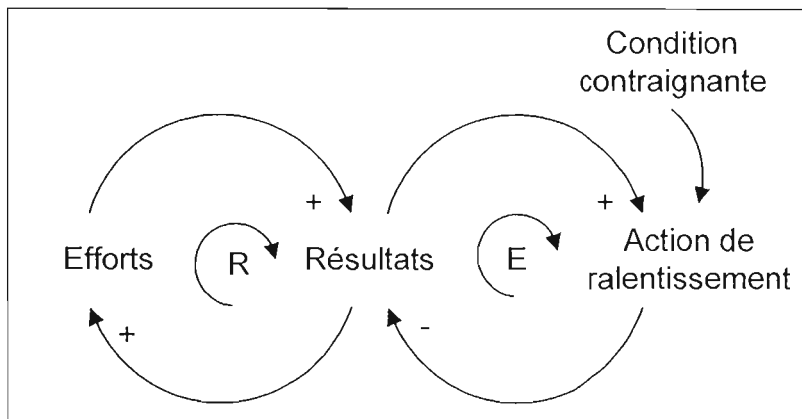
Suite au développement de la DS, Senge (1990) a élaboré des archétypes de systèmes génériques afin d'illustrer des situations qui sont largement répandues dans les organisations. De par cette caractéristique générale, ces DI peuvent être utilisés dans une multitude de situations. Alors qu'ils sont nullement spécifiques à l'organisation, il n'est resté pas moins que les analogies avec des situations réelles en entreprise ne sont pas impossibles.

Braun (2002) souligne que ces archétypes peuvent être utilisés tant à des fins diagnostiques que prognostiques. L'archétype est un point de départ pour aider le gestionnaire à comprendre les comportements présents dans l'organisation. De nature générique, les archétypes ne peuvent servir de modèles qu'au plan pédagogique. Ils sont utiles pour comprendre la nature des problèmes sous-jacents et offrent une structure de base ou fondement sur lequel un modèle sera développé et construit (Braun, 2002).

### 1.3.4.1 Limite à la croissance

Parmi les archétypes les plus observés figure celui de « la limite à la croissance ». La figure 17 montre que la croissance continue sans atténuation ni restriction est impossible. Au niveau théorique, cet archétype exprime qu'un processus de renforcement de croissance grandissante se doit de rencontrer un processus d'équilibre lorsque'il approche la limite du système (Braun, 2002).

**Figure 17- Archétype : Limite à la croissance**



Source : (Braun, 2002)

Au niveau managérial, cet archétype est un rappel dédié au gestionnaire de prendre le temps d'examiner ce qui peut nuire aux efforts de développement (Braun, 2002). La force contraignante peut provenir de deux sources. Au sein de l'entreprise, cette force peut émerger d'un autre département (source interne). Au niveau de l'environnement externe, cette dynamique peut émaner d'un concurrent, ou d'une nouvelle politique gouvernementale. Braun révèle :

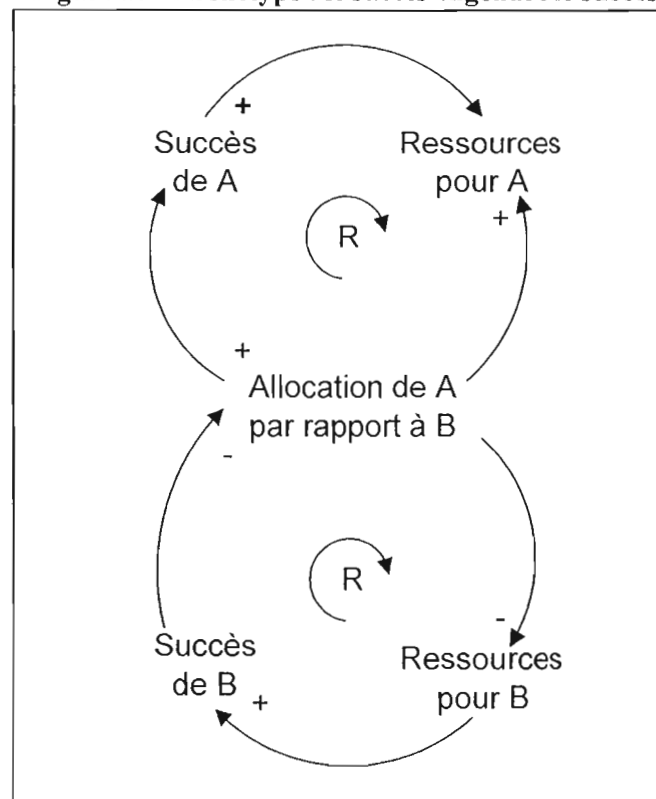
« qu'en focalisant son attention sur ces limites, le gestionnaire peut trouver des opportunités pour voir sa courbe d'amélioration progresser. Il peut également identifier les éléments du système qui représentent ce frein et ainsi par de nouvelles initiatives peut ultimement réduire ou contre carrer ces limites » (Braun, 2002, p. 4).



### 1.3.4.2 Le succès engendre le succès

L'archétype « le succès engendre le succès » illustre une dynamique connue des organisations, à savoir la valorisation des projets atteignant plus rapidement leurs objectifs. La figure 18 montre cet archétype. Lors de la mise en place de divers projets, il arrive qu'un projet A atteigne un succès relatif plus élevé qu'un projet B même si les deux projets bénéficient d'un niveau de ressources semblables. Composé de deux boucles de renforcement, l'archétype suivant présente l'effet de rétroaction positif décrit à la section 1.1.1. Le projet A illustre le cercle vertueux alors que le projet B est, quant à lui, la représentation du cercle vicieux.

**Figure 18 - Archétype : le succès engendre le succès**



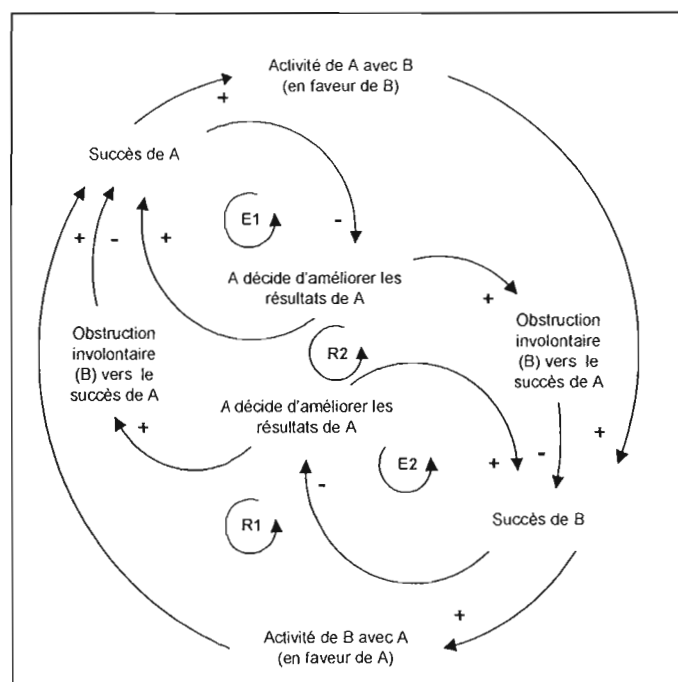
Source : (Braun, 2002)

Au niveau managérial, cet archétype permet de sensibiliser les gestionnaires à l'importance d'offrir un niveau de ressources équivalent aux divers projets. Ce DI met l'emphasis sur la nécessité de continuer le support aux projets, et ce, même si de prime abord l'un d'entre eux semble avoir un décollage plus lent. Cloutier (2006) présente le succès engendre le succès dans le principe de gestion suivant : il doit « s'assurer que les parties disposent des ressources pour l'atteinte d'objectifs respectifs ».

#### 1.3.4.3 Les adversaires accidentels

L'archétype « les adversaires accidentels » représente une relation entre deux partenaires qui souhaitent collaborer à l'intérieur d'une vision gagnant-gagnant. La figure 19 montre l'archétype des adversaires accidentels. L'union des deux sujets est basée sur les forces respectives de chacun dans le but d'accomplir à deux, ce qui ne peut être fait seul. Les faiblesses de chacun se faisant, sont minimisées par la collaboration des partenaires.

**Figure 19 - Archétype : adversaires accidentels**



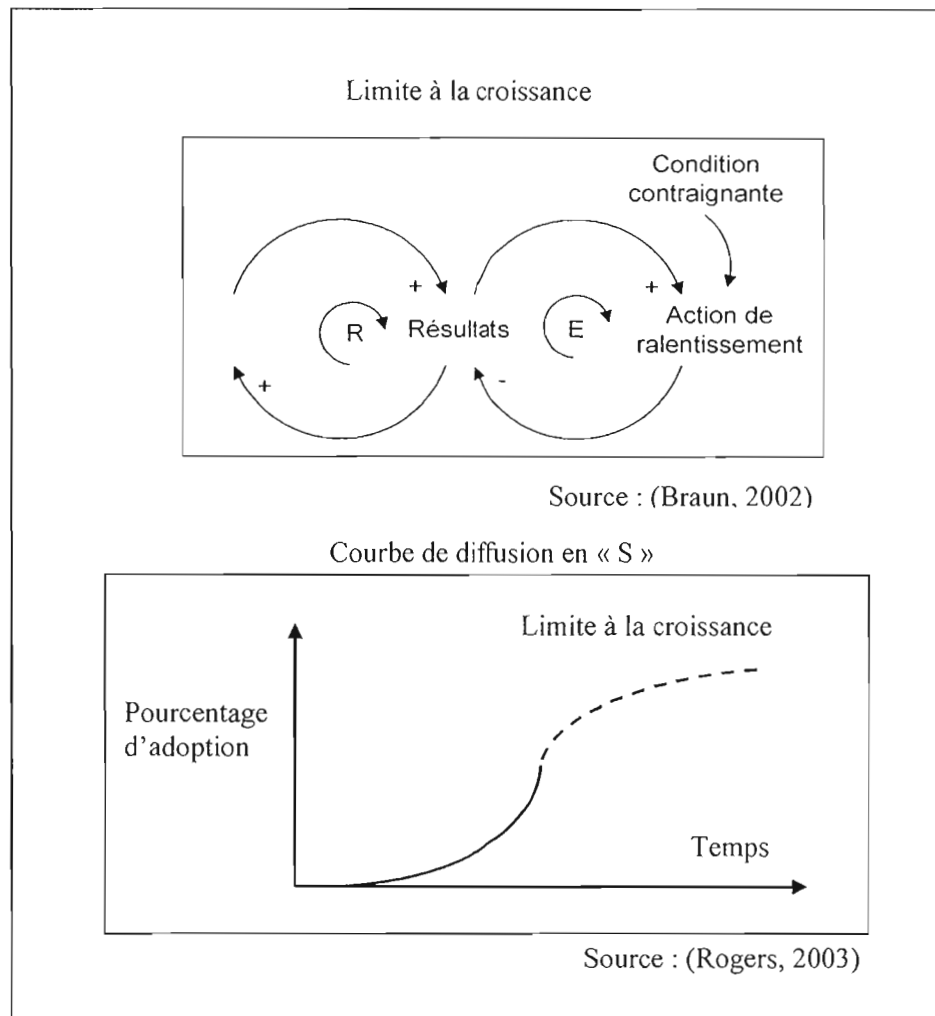
Source : (Braun, 2002, p. 19)

Braun explique qu'ensuite, involontairement et accidentellement, un des partenaires prend une action que le second partenaire interprète comme une action de mauvaise foi à son égard. Le partenaire brimé par un avantage déloyal, ou un tort présumé modifie sensiblement son attitude vis-à-vis la collaboration. Le partenaire brimé est d'avis que l'autre partenaire a engagé cette action volontairement et dans une optique d'hostilité entre eux deux. De sorte que le partenaire offensé refuse d'engager le dialogue entre les parties et choisit d'agir en sa faveur pour rétablir une justice relative entre eux. Or, le partenaire qui pose la première action involontaire et accidentelle ne connaît rien de la frustration et des actions entreprises par le partenaire. Suivant la constatation de l'action de son partenaire, le premier déclenche à son tour le même processus et ainsi de suite jusqu'au terme de la relation. Les cadres mentaux sont à la base de ces incompréhensions.

### 1.3.5 Application en diffusion de l'innovation

Dans le cadre de cette recherche portant sur la diffusion de l'innovation, l'observation de l'archétype de « la limite à la croissance » permet de faire le parallèle, présenté à la figure 20, avec la courbe de diffusion en « S » de Rogers présentée dans la section 1.2. La seconde moitié de cette courbe présente une diminution du taux de croissance qui s'accroît jusqu'à l'atteinte de l'asymptote. Cette limite représente l'adoption complète à l'intérieur du système.

**Figure 20 - Limite à la croissance : application à la diffusion de l'innovation**

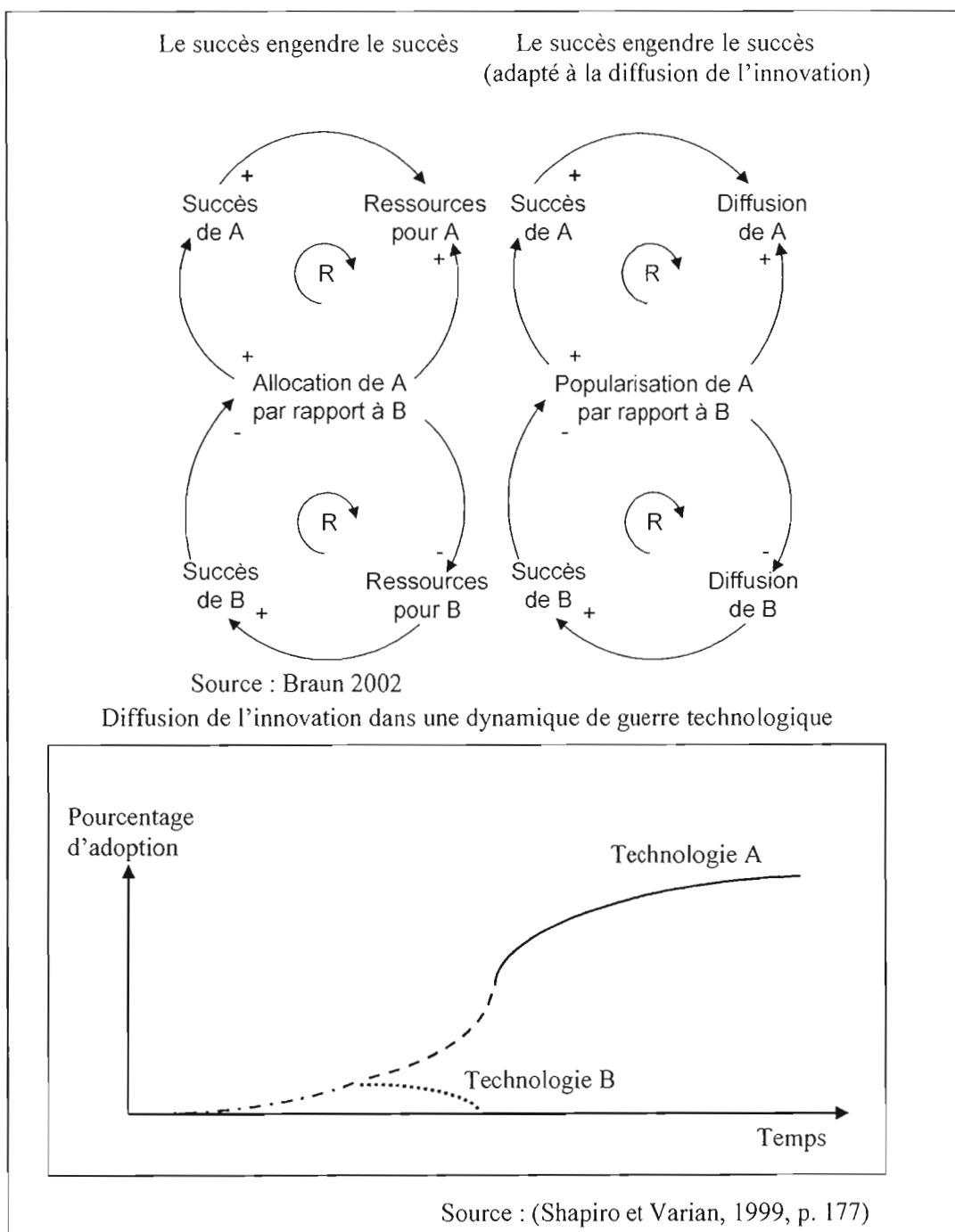


L'archétype « le succès engendre le succès » permet, dans le cadre de cette recherche, de mieux comprendre la dynamique du « *winner takes all* ». Dans l'objectif d'illustrer cette idée, le modèle de Braun (2002) est adaptée à la diffusion de l'innovation à la figure 21.

Alors que l'archétype original a pour but de faire prendre conscience au gestionnaire de la disparité dans l'allocation des ressources, le second archétype a un tout autre but. La version modifiée permet d'illustrer une dynamique de guerre technologique au sein d'un système. Alors que le lancement des deux technologies est fait simultanément, on remarque que suite au basculement technologique une seule dominera le marché. La technologie alors écartée risque ainsi une forte marginalisation, voire même l'oubli.

Au niveau de la diffusion de l'innovation, ce DI modifié démontre aux diffuseurs d'innovations l'importance de l'effet de rétroaction positif. Cette sensibilisation permet aux diffuseurs d'adapter leurs stratégies en fonction de la dynamique des cercles vertueux et vicieux.

**Figure 21 - Le succès engendre le succès : la diffusion de l'innovation**



### 1.3.6 Synthèse

Face à la complexité grandissante du monde qui les entourent, les décideurs dotés d'une rationalité limitée doivent se tourner vers des méthodes de recherche et d'aide à la décision afin de les assister dans leurs tâches décisionnelles. La méthode de la DS a été élaborée dans le but d'aider le gestionnaire à mieux comprendre les systèmes qui l'entourent. Ainsi, celui-ci prend conscience des effets que la structure engendre sur le comportement des systèmes. À l'aide du modèle de simulation, il peut non seulement modéliser le système, mais également jouer avec les variables pour observer et tester des hypothèses, faire des projections ou simplement jouer avec les différentes variables pour observer le comportement du modèle.

## 1.4 Évolution de la législation environnementale

Tout au long du XX<sup>e</sup> siècle, les populations et leurs gouvernements ont privilégié la croissance économique, et malgré l'émergence, au cours des années 1970, d'un ethos environnemental, l'économie et l'environnement ont toujours fait l'objet d'études largement séparées (McBean et Coleman, 2002, p.25-26)

Les premières recherches portant sur la couche d'ozone ont eu lieu dans les années 1930. C'est dans les années 1970 que certaines hypothèses émergent au sujet de sa destruction potentielle. Les chercheurs de l'époque ont émis des réserves quant à l'innocuité des aéronefs traversant la stratosphère. Conjointement, une théorie portant sur le rôle des chlorofluorocarbures (CFC) dans l'épuisement de la couche d'ozone a fait son apparition (Environnement Canada, 1997). D'abord ignorée, cette seconde hypothèse a convaincu le milieu scientifique de sa « validité », et ce, suite à de nouvelles recherches ainsi qu'à la surveillance de la couche d'ozone.

Ce n'est que lors de la découverte d'un trou dans la couche d'ozone, en 1985, que ce phénomène environnemental a pris une réelle importance dans l'opinion publique. Pour la première fois, la communauté scientifique détient une preuve de l'amincissement de la couche d'ozone.

#### 1.4.1 L'effet de serre et les gaz à effet de serre

L'effet de serre représente un phénomène naturel qui permet à la Terre de conserver une température moyenne de 15° C, sans quoi, la température moyenne serait de -18°C et la vie sur la terre telle que nous la connaissons n'existerait pas (Environnement Canada, 2005). L'effet de serre permet d'emprisonner la chaleur du soleil en empêchant la dissipation des rayons solaires. Ce phénomène est possible principalement grâce à la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'oxyde nitreux présents dans l'air.

Or, l'activité humaine est venue troubler l'équilibre naturel de l'effet de serre. En augmentant les concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, l'activité humaine a favorisé « l'effet de serre naturel au point où il risque de provoquer le réchauffement de la planète à une vitesse jamais vue auparavant » (Environnement Canada, 2005, p. 1). Les substances favorisant l'effet de serre étant régies par la Convention-cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) sont présentées au tableau 3.

**Tableau 3 - Substances visées par le CCNUCC**

Substances régies par le Protocole de Montréal	Substances régies par le Protocole de Kyoto
Les halons	Le dioxyde de carbone
Les chlorofluorocarbones (CFC)	Le méthane
Les hydrochlorofluorocarbones (HCFC)	L'oxyde nitreux
Le bromure de méthyle	Les hydrofluorocarbones
Le bromochlorométhane	Les hydrocarbures perfluorés
-----	L'hexafluorure de soufre

L'augmentation de la concentration de ces gaz provient de deux sources : 1) l'émission et 2) le stockage. L'activité humaine est au cœur des émissions des GES. La première catégorie groupe l'utilisation des combustibles fossiles et autres gaz naturels pour la fabrication d'électricité, l'usage des industries ainsi que des véhicules. La seconde catégorie a trait à la



destruction de zones de stockage de GES. Au cours des 100 dernières années, les activités humaines ont « (...) défrâichi (...) plus de terre que dans toute l'histoire de l'humanité, ce qui a entraîné la perte de forêts et de terres humides, qui absorbent et emmagasinent les GES et régularisent l'atmosphère. » (Environnement Canada, 2005, p. 1).

Face à ce problème croissant dont les conséquences sont planétaires, l'humanité ne peut rester en plan devant une telle menace. En effet, le réchauffement de la planète risque de déstabiliser l'équilibre géostratégique. Alors qu'une minorité de pays est principalement responsable de cette situation, c'est l'ensemble de la planète qui en paie le prix. Les pays moins développés sont ceux qui, de par leur climat, risquent d'être les plus affectés. Le réchauffement climatique affecte non seulement les forêts, le cycle de l'eau, les réserves d'eau, le niveau de la mer, mais il facilitera également la migration de maladies vers des régions nordiques. C'est l'ensemble du commerce international qui risque d'être transformé. Alors que certains pays possèdent plus de ressources face à cette crise, d'autres pays risquent gros.

C'est durant la décennie 1980 que la Commission mondiale sur l'environnement et le développement présente l'expression de développement durable (DD). La notion de DD qui s'en suit représente une première puisqu'elle réunit à la fois la notion environnementale et économique dans un construit. La définition du DD telle que décrite par la Commission est : « L'humanité a la capacité de rendre le développement durable - afin de répondre aux besoins du présent sans compromettre les possibilités des générations futures de satisfaire leurs propres besoins. » (Commission Brundtland, 1987).

Le rapport de la Commission Brundtland a permis d'élaborer les bases sur lesquelles la population mondiale tente de concilier l'expansion économique et la protection du milieu naturel de la planète et ce, tout en tenant compte de l'importance de la satisfaction des besoins futurs.

#### 1.4.2 Accords environnementaux multilatéraux

Alors que la situation climatique devient de plus en plus préoccupante, des groupes se forment pour étudier non seulement la question, mais aussi pour tenter de trouver des pistes de solutions. La nature du problème exige que l'on parvienne à un consensus à l'échelle internationale (McBean et Coleman, 2002, p. 29) :

Il serait inutile de procéder comme on le fait parfois et de fractionner le problème en parties, sous prétexte qu'elles sont plus faciles à gérer. Seule une approche globale axée sur la gestion des ressources environnementales et la coordination du développement durable pourra porter fruits (Rosenau, 1997; McBean et Coleman, 2002, p. 29).

Les sections suivantes présentent un survol des actions entreprises dans le cadre de la lutte au GES.

##### 1.4.2.1 Comité de coordination de la couche d'ozone

C'est en 1977 que le Programme de Nations Unies pour l'environnement (PNUE) crée le Comité de coordination de la couche d'ozone. En 1981, on présente une première convention à la communauté internationale. Les premières négociations sont très difficiles. Alors que la portée de la menace n'est pas bien comprise et que certains doutent même de la validité de la science, un sentiment de doute, partagé par beaucoup, portait sur la possession des capacités technologiques nécessaires pour relever ce défi (Environnement Canada, 1997).

##### 1.4.2.2 Protocole de Montréal

C'est en 1985 que la Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone est signée. Alors que les parties ne s'entendent pas sur les mesures de contrôle, ils s'accordent pour participer à deux rencontres au cours des deux prochaines années afin d'élaborer un protocole sur les mesures de contrôle.

Après deux années de pourparlers, 24 pays signaient le protocole de Montréal le 16 septembre 1987. Ce protocole complexe est caractérisé par un « processus dynamique au niveau du contrôle de toutes les substances menaçant l'ozone, et non pas seulement les substances initialement désignées par le protocole » (Environnement Canada, 1997).

Ci-dessous, l'objectif du Protocole de Montréal tel que présenté lors de sa ratification le 30 juin 1988.

Prescrire des mesures de précaution pour réglementer équitablement et éventuellement éliminer toutes les émissions mondiales de substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO). À cette fin, les Parties doivent éliminer graduellement la production et la consommation de SACO ainsi que réduire et cesser le commerce de ces substances (Environnement Canada, 2006).

En 1997, le Protocole de Montréal comptait 160 membres. Le Protocole a été maintes fois modifié depuis sa signature. L'ajout de nouveaux composés à la liste des substances qui appauvrissent la couche d'ozone en est un exemple. En 1996, Environnement Canada observe que les concentrations de CFC dans la basse atmosphère ont commencé à s'amenuiser (1997). Or le rétablissement de la couche d'ozone reste encore un lointain objectif.

#### 1.4.2.3 Protocole de Kyoto

En 1992, 180 pays participaient à la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement. Ensemble, ils ont adopté l'Action 21, un plan directeur en faveur du développement durable. Ces mêmes pays ont signé la Convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC). L'extrait suivant, de l'article 2, présente l'objectif de celle-ci :

« (...) Stabiliser (...) les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique. Il conviendra d'atteindre ce niveau dans un délai suffisant pour que les écosystèmes puissent s'adapter naturellement aux changements climatiques, que la production alimentaire ne soit pas menacée et que le développement économique puisse se poursuivre d'une manière durable. »

Or bien avant ...

En 1987, c'est le 10<sup>e</sup> congrès de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) qui reconnut le besoin de compréhension objectif, pondéré, scientifiquement et internationalement coordonné dans le but de comprendre les effets des concentrations grandissantes de gaz à effet de serre sur le climat de la terre et sur les effets de ces changements sur les modèles socio-économiques. Pour le suivi, le conseil exécutif de l'OMM a demandé à son secrétaire général d'établir *ad hoc* en coordination avec le directeur exécutif du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) un mécanisme intergouvernemental afin de procurer des connaissances sur le changement climatique (IPCC<sup>1</sup>, 2004, p. 2).

---

<sup>1</sup> « *Intergovernmental Panel on Climate Change* » Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)

Ce Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC) a été fondé en 1988. Les sections suivantes présenteront l'importance du GIEC dans la création de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). L'extrait suivant présente la mission du GIEC telle que décrite sur le site Internet de l'IPCC :

« Le GIEC a pour mission d'évaluer, sans parti pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les fondements scientifiques des risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue» (GIEC, 2006)

Outre les diverses fonctions du GIEC,

« ... l'une des principales activités du GIEC consiste à procéder, à intervalles réguliers, à une évaluation de l'état des connaissances relatives au changement climatique. Le GIEC élabore aussi des rapports spéciaux et des documents techniques sur des sujets qui nécessitent des informations et des avis scientifiques indépendants et contribue en outre à la mise en œuvre de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) par ses travaux sur les méthodes à appliquer pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre. » (GIEC, 2006)

Le premier rapport du GIEC, allait constituer la base sur laquelle les premières négociations de la CCNUCC eurent lieu. Selon McBean et Coleman, le premier rapport, émis en 1990, de l'organisme était hésitant dans ses conclusions... (2002, p. 27). Le second rapport, présenté en 1995, plus spécifique et prudent, allait approvisionner d'informations les débats de la 3<sup>e</sup> conférence de la CCNUCC organisée à Kyoto en 1997 (McBean et Coleman, 2002, p. 27).

Traité ajouté à la CCNUCC, le Protocole de Kyoto représente l'étape suivante en matière de changements climatiques. Alors que l'entrée en vigueur du Protocole de Kyoto fut longuement menacée à cause des conditions *sine qua non* de son lancement, soit de faire

ratifier au moins 55 pays dont les émissions totales de dioxyde de carbone représentaient, en 1990, au moins 55 % du total des émissions de dioxyde de carbone. La polémique de la non-ratification des États-Unis et de l'Australie, pays plus grands émetteurs de GES, a littéralement mis le Protocole en péril. La Russie se décidant finalement à participer au Protocole, celui-ci atteignit la barre des 55 % du total des émissions de 1990. Signé en 1997, le Protocole entre en vigueur le 16 février 2005.

La CCNUCC art. 3 par.1 dit :

« Il incombe aux Parties de préserver le système climatique dans l'intérêt des générations présentes et futures, sur la base de l'équité et en fonction de leurs responsabilités communes mais différenciées et de leurs capacités respectives. Il appartient, en conséquence, aux pays développés parties d'être à l'avant-garde de la lutte contre les changements climatiques et leurs effets néfastes » (CCNUCC, 1992).

Les États ont des « responsabilités communes mais différenciées », et que des mesures de précaution appropriées doivent être prises (« [...] l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures [...] ») (McBean et Coleman, 2002, p. 26).

Le Protocole de Kyoto de la CCNUCC art.3 par.1 dit :

« Les Parties visées à l'annexe I font en sorte, individuellement ou conjointement, que leurs émissions anthropiques agrégées, exprimées en équivalent-dioxyde de carbone, des gaz à effet de serre indiqués à l'annexe A ne dépassent pas les quantités qui leurs sont attribuées, calculées en fonction de leurs engagements chiffrés en matière de limitation et de réduction des émissions inscrits à l'annexe B et conformément aux dispositions du présent article, en vue de réduire le total de leurs émissions de ces gaz d'au moins 5 % par rapport au niveau de 1990 au cours de la période d'engagement allant de 2008 à 2012 » (Protocole de Kyoto, 1998).

Comme l'augmentation des niveaux de GES dans l'atmosphère est plus largement due aux pays industrialisés, ce sont eux qui, dans ce protocole, premier d'une série, sont appelés à respecter leurs « responsabilités communes mais différenciées » (McBean et Coleman, 2002).

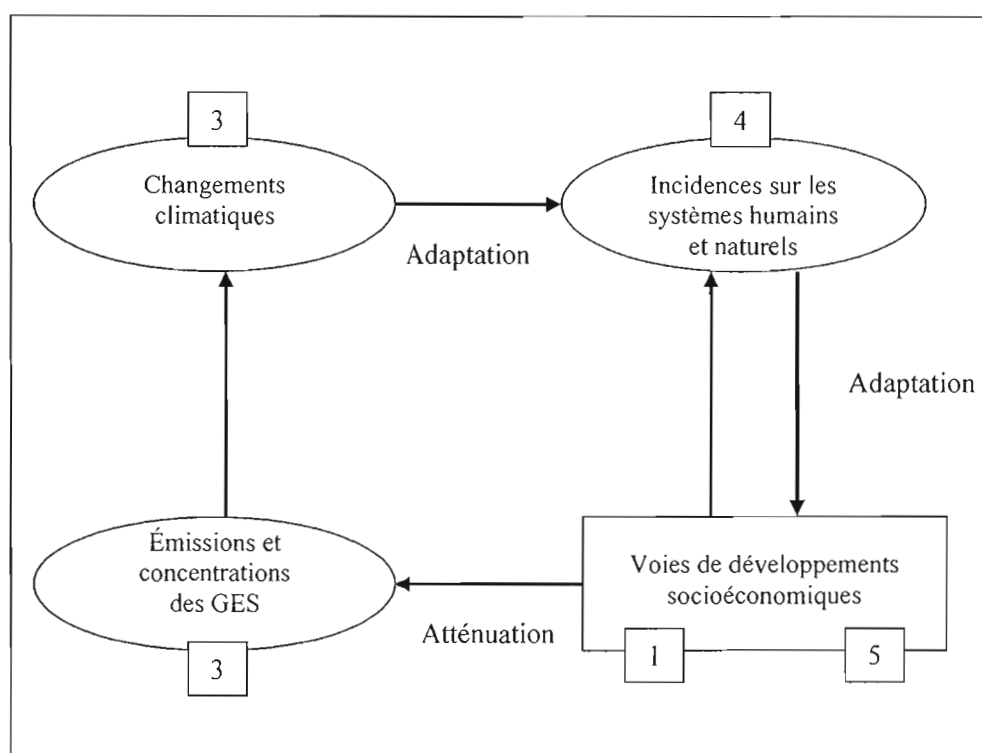
Alors que les concentrations de GES dépendent du résultat net des sources d'émission et des puits de gaz, les différents protocoles proposent différentes méthodes afin d'aider les pays à atteindre leur objectif. Le Protocole de Kyoto prévoit trois types de mécanismes. Le premier repose sur l'échange de droit d'émission, autorisé entre les pays industrialisés. Le second, dépend de l'application conjointe qui accorde des crédits aux pays qui investissent dans des pays industrialisés. Le troisième est un mécanisme pour un développement propre qui accorde des crédits aux pays qui investissent dans des pays en développement. Avec ces mécanismes, un pays qui est dans l'impossibilité de rencontrer son objectif peut, dans le cadre du protocole de Kyoto, acheter des droits d'émission à un autre pays qui en possède un surplus. La possibilité de transiger ces droits est un enjeu important dans le protocole de Kyoto. La création d'une bourse du climat est une conséquence des mécanismes proposés par le protocole.

C'est en 2002 que la majorité de ces pays se sont réunis à nouveau, lors du Sommet mondial sur le développement durable à Johannesburg, pour un compte-rendu. Selon McBean et Coleman (2002), il semble que certains éléments de l'objectif de la CCNUCC constituent un frein au développement de celle-ci. Le précédent extrait de l'objectif présente à la fois des termes qui restent à définir, et d'autres qui sont mal définis (2002). C'est respectivement le cas de perturbation anthropique « dangereuse » et de « délai suffisant » pour permettre.

### 1.5 Cadre intégré des changements climatiques

« Tout en reconnaissant qu'une certaine incertitude scientifique règne, l'écrasante majorité des experts scientifiques estime que le changement climatique résultant des activités humaines est inévitable » (McBean et Coleman, 2002). La figure 22 montre un cadre intégré qui illustre la dynamique du développement versus ses effets sur les changements climatiques en fonction d'émission de gaz à effet de serre.

**Figure 22 - Changements climatiques : Un cadre intégré**



Source : (McBean et Coleman, 2002, p.30, adapté de Watson et al., 2001, p. 3)

### 1.6 Conclusion

Ce chapitre divisé en quatre sections a présenté les éléments de la littérature au niveau de la diffusion des innovations, de la dynamique des systèmes, des législations environnementales ainsi qu'un cadre intégré portant sur les changements climatiques.



## CHAPITRE II

### CONTEXTE DE LA RECHERCHE

#### 2.1 Introduction

Cette recherche propose l'étude d'un système complexe avec trois niveaux d'acteurs. Le premier niveau est constitué des producteurs agricoles dont la gestion des déjections provenant des animaux devient un obstacle majeur à la rentabilité. Dans certains cas, c'est la viabilité même des exploitations agricoles qui est menacée. Le second, illustre le milieu municipal. Tantôt législateurs, tantôt régies, les municipalités, de par leurs rôles, se doivent de rencontrer dans le cadre de leurs activités certaines obligations. La récupération des matières putrescibles et la gestion des boues municipales, industrielles et des fosses septiques sont de nouvelles préoccupations qui nécessitent réflexions et investissements majeurs tant au niveau municipal que commercial. Le troisième niveau d'acteur représente le citoyen. Il est responsable de la production des matières putrescibles qui devront être prises en charge par la municipalité. Son rôle d'influence au sein du système est non négligeable. La section suivante présente les différents contextes liés aux acteurs et le contexte législatif.

#### 2.2 Le contexte législatif

Cette section présente deux mesures qui viennent sensiblement modifier le contexte opérationnel des activités des producteurs agricoles au niveau de l'élevage, des municipalités ainsi que de l'action citoyenne. Le macro environnement qui englobe ses acteurs influence non seulement le système, mais également la manière dont le système évolue en fonction de la problématique.

### 2.2.1 Politique intégrée des déchets

C'est en 1989, que le gouvernement du Québec se dotait d'une politique de gestion intégrée des déchets. L'objectif de cette loi était d'assurer la réduction de 50 % des déchets solides pour l'an 2000. Alors que la politique a doublé la quantité de résidus mis en valeur entre 1989 et 1999, elle n'a permis qu'une réduction de 10,8 % alors que l'objectif initial était cinq fois supérieur (Gazette officielle du Québec, 2000).

Selon le ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parc, « s'appuyant largement sur des mesures volontaires et considérant un contexte de faibles coûts d'élimination par rapport aux coûts de récupération et de mise en valeur, la Politique de 1989 n'a pas atteint les objectifs escomptés » (MDDEP, 2006, p. 2). C'est en 1996, suite à ce constat, que le gouvernement ordonna au Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) d'effectuer une consultation publique sur cette problématique. Le Rapport de l'organisme *Déchets d'hier, ressources de demain* prescrit la mise en place d'approches et d'outils plus structurants, d'obligations législatives et réglementaires. Cette recommandation s'est concrétisée par la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008.

### 2.2.2 La Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008

Les principes reliés à la politique sont divers. La loi présente cinq principes fondamentaux : 1) les 3RV-E, 2) la responsabilité élargie des producteurs, 3) la participation des citoyens et citoyennes, 4) la régionalisation et, 5) le partenariat. Par ailleurs, la loi a deux objectifs : a) la mise en valeur de 65 % des matières résiduelles pouvant être mises en valeur annuellement et, b) l'assurance d'une activité d'élimination sécuritaire, tant pour les personnes que pour l'environnement. La sous-section suivante présente les principes fondamentaux ainsi que les objectifs de la Politique.

### 1) Les 3RV-E

L'acronyme 3RV-E symbolise : (3R) la Réduction à la source, le Réemploi et le Recyclage, (V) Valorisation (agronomique ou énergétique) et (-E) diminution de l'Élimination. Ces activités doivent être privilégiées dans leur ordre de présentation. Ainsi, on remarque que l'élimination reste une solution de dernier recours.

### 2) La responsabilité élargie des producteurs

Dans ce cadre législatif :

« fabricants et importateurs de produits assument une grande partie de la responsabilité des effets environnementaux de leurs produits tout au long de leur cycle de vie, y compris les effets en amont inhérent aux choix des matériaux composant le produit, les effets du processus de fabrication ou de production comme tel et les effets en aval de leur utilisation et de la mise au rebut des produits. » (Gazette officielle du Québec, 2000, p. 969)

### 3) La participation des citoyens et citoyennes

L'atteinte des objectifs nécessite la participation citoyenne tant au niveau de l'élaboration, mais également au niveau du suivi des moyens mis en place pour une gestion écologique des matières résiduelles. À ce titre, les citoyens auront accès aux informations pertinentes sur le sujet, ainsi qu'aux tribunes appropriées pour faire valoir leurs droits au niveau du processus de décision des autorités.

### 4) La régionalisation

Les décisions relatives au choix de moyens et la mise en œuvre de la loi sont laissées aux autorités municipales. L'opérationnalisation se situe au niveau des municipalités régionales de comté (MRC).

### 5) Le partenariat

La politique suggère la création d'une synergie entre les acteurs afin de mettre en place les actions nécessaires à l'atteinte des objectifs. L'extrait suivant présente la vision prônée dans le cadre législatif.

« En assumant son rôle, sa mission et sa part de responsabilité, chaque intervenant contribue à mettre en place de façon cohérente, concertée et complémentaire les moyens nécessaires à l'atteinte des objectifs et ce, en collaboration avec les autres intervenants qui agissent de même. »  
(Gazette officielle du Québec, 2000, p. 969)

### 6) Les objectifs

En 1999, la Loi sur la Politique québécoise de la gestion des matières résiduelles 1998-2008 entraine en vigueur. Ces deux objectifs : a) la mise en valeur et b) l'élimination sécuritaire des matières résiduelles sont présentés dans les sous-sections suivantes.

6 a) Cette politique a pour objectif général la mise en valeur de plus de 65 % des matières résiduelles annuellement. Le tableau 4 montre les différents objectifs sectoriels. Les objectifs de la politique y sont divisés en trois secteurs d'activités : 1) le secteur municipal, 2) le secteur industriel commercial et institutionnel (ICI) et, 3) le secteur de la construction, rénovation et démolition (CRD).

Tableau 4 - Objectifs de récupération à atteindre d'ici 2008

SECTEUR MUNICIPAL		Quantités pouvant être valorisées (x 1000 tonnes)	Résidus à récupérer Objectif (%)	Tonnage (x 1000 tonnes)	Résidus récupérés en 1996 (x 1000 tonnes)
MATIÈRES RECYCLABLES					
Total des fibres		555	60%	333	198
Contenants consignés		42	80%	34	29
Contenants non-consignés		260	60%	156	62
Aluminium non-consignés		12	20%	2	nd
SOUS-TOTAL		869	60%	525	289
MATIÈRES PUTRESCIBLES					
Résidus putrescibles		589	60%	353	n-d
Herbes et feuilles		221	60%	133	n-d
SOUS-TOTAL		810	60%	486	84
PRODUITS RÉEMPLOYABLES					
Textiles		54	50%	27	10
Encombrants		273	60%	164	102
SOUS-TOTAL		327	58%	191	112
Résidus dangereux		27	60%	16	3
TOTAL MUNICIPAL		2 033		1 218	488

SECTEUR INDUSTRIEL, COMMERCIAL ET INSTITUTIONNEL		Quantités pouvant être valorisées (x 1000 tonnes)	Résidus à récupérer Objectif (%)	Tonnage (x 1000 tonnes)	Résidus récupérés en 1996 (x 1000 tonnes)
MATIÈRES RECYCLABLES					
Papiers et emballage		882	70%	617	598
Verre		38	95%	36	36
Plastique		162	70%	113	26
Métaux		1 081	95%	1 027	1 001
Textiles		nd	70%	nd	17
SOUS-TOTAL		2 162	83%	1 793	1 677
MATIÈRES PUTRESCIBLES					
Bois		202	70%	142	n-d
Résidus putrescibles		188	60%	113	n-d
SOUS-TOTAL		390	65%	254	30
PNEUS		63	85%	54	17
TOTAL ICI		2 615	80%	2 101	1 724

SECTEUR CONSTRUCTION ET DÉMOLITION		Quantités pouvant être valorisées (x 1000 tonnes)	Résidus à récupérer Objectif (%)	Tonnage (x 1000 tonnes)	Résidus récupérés en 1996 (x 1000 tonnes)
RÉSIDUS VALORISABLES					
Papiers et emballages		75	60%	45	n-d
Acier		81	60%	49	n-d
Granulas		1 908	60%	1 145	n-d
Bois		394	60%	236	n-d
TOTAL C & D		2 458	60%	1 475	875

GRAND TOTAL				
Quantité Générée (x 1000 tonnes)	Quantités pouvant être valorisées (x 1000 tonnes)	Résidus à récupérer Objectif (%)	Tonnage (x 1000 tonnes)	Résidus récupérés en 1996 (x 1000 tonnes)
8 312	7 106	67%	4 793	3 088

Source : (Gazette officielle du Québec, 2000)

Adoptées en 1999, les modifications législatives à la Loi sur la qualité de l'environnement obligent les municipalités régionales à élaborer les PGMR dès 2001. Les éléments constitutifs d'un PGMR sont présentés dans le tableau 5.

**Tableau 5 - Éléments constitutifs d'un PGMR**

1	Une description du territoire d'application
2	Un inventaire des matières résiduelles produit sur ce territoire, selon l'origine et le type de matières
3	Un énoncé des orientations et objectifs de mise en valeur et d'élimination à atteindre et une description des services à offrir pour les atteindre
4	Un recensement des organismes, entreprises et installations de mise en valeur et d'élimination sur le territoire et, le cas échéant, l'identification des nouvelles installations requises ou le besoin de recourir à des services en dehors du territoire
5	Un calendrier de mise en œuvre et des prévisions budgétaires
6	Un système de surveillance et de suivi de la mise en œuvre du plan

Source : (MDDEP, 2006)

6 b) Au niveau de l'élimination sécuritaire des MR, second objectif de la politique, notons que la politique veut assurer la sécurité des activités d'élimination tant pour les personnes que pour l'environnement. À ce niveau, notons l'entrée en vigueur du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération des matières résiduelles en janvier 2006.

Pour atteindre ces objectifs, la Politique prévoit 29 actions groupées en quatre axes d'intervention : 1) planification de la gestion des matières résiduelles et mobilisation des intervenants, 2) réduction des risques de contamination de l'environnement, 3) récupération et mise en valeur des matières résiduelles et, 4) réduction de la production des matières résiduelles et récupération dans les secteurs industriels commercial et institutionnel. Les 29 actions prévues dans la politique sont en annexe 2 de la recherche. Les deux principaux organismes en charge de la mise en œuvre sont le Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs et Recyc-Québec.

Au niveau des boues, la politique prévoit : « qu'éventuellement aucune boue ne devrait être éliminée sans démonstration qu'il n'est pas économiquement viable de la valoriser » (MDDEP, 2006, p. 17). Il est important de noter que les matières résiduelles dites dangereuses, telles que les déchets biomédicaux, les résidus de pâtes et papiers de même que fertilisants agricoles (fumiers), etc., sont exclus de la Politique et qu'elles ne sont donc pas comptabilisées dans le tableau 3.

### 2.2.3 Présentation du rapport intérimaire de la politique 1998-2008 du MDDEP

Cinq ans suivant l'adoption de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008 (PQGMR 98-08), une évaluation a été complétée. L'objectif de cette évaluation est de revoir au besoin les orientations de la Politique en fonction des résultats intérimaires. Ce rapport, rendu public en 2006, dresse un portrait sombre au niveau de l'atteinte des objectifs.

Au niveau de l'application, le rapport intérimaire constate que :

« ... la loi ne prévoit pas de mesures particulières pour inciter les municipalités à adopter, réviser ou appliquer les PGMR. Sans une plus grande imputabilité des instances municipales régionales et locales quant à l'atteinte des résultats, cet exercice de planification pourrait ne pas s'avérer à la hauteur de son potentiel » (MDDEP, 2006, p. 16).

Au sujet des boues (de fosses septiques, d'usine d'épuration et industrielle), la Politique propose une gestion selon une planification régionale pour favoriser la valorisation de celles-ci. Le rapport intérimaire souligne que : « l'obligation d'établir des plans directeurs des boues dans les PMGR n'est pas reconduite explicitement dans la loi. » (MDDEP, 2006, p. 17). En 2004, seulement 10 % des boues municipales ont été récupérées et compostées (MDDEP, 2006).

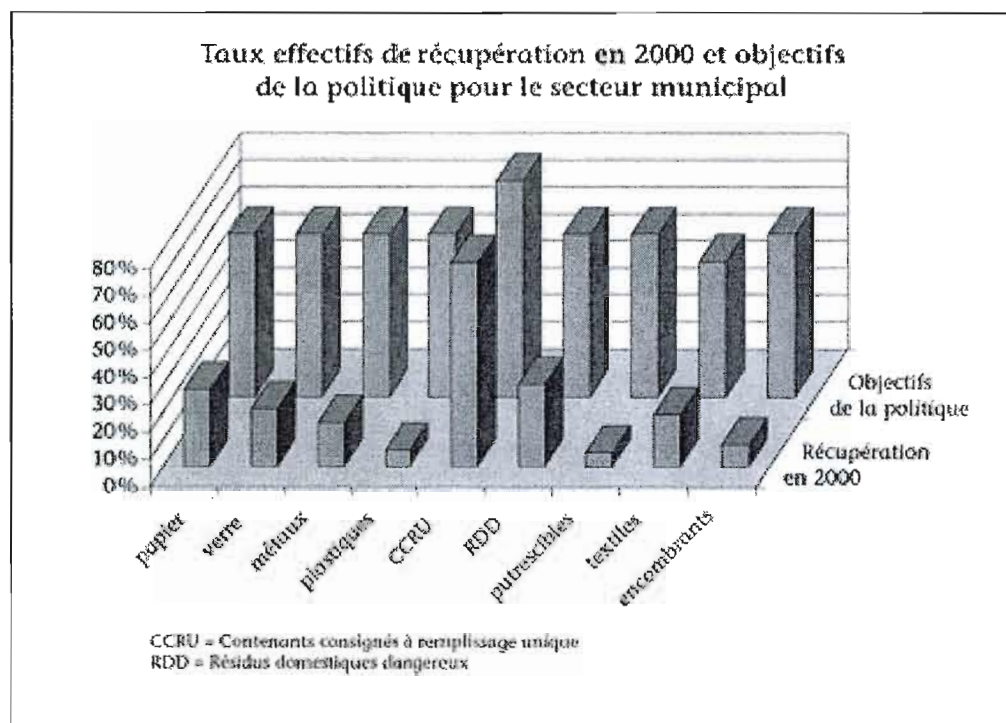
Selon le Ministère, l'élaboration de véritables plans directeurs des boues aurait permis de mieux connaître les types et les quantités de boues générées, d'en préciser la provenance et la qualité, de déterminer dans quelle mesure leur valorisation peut être privilégiée, tant du point de vue environnemental qu'économique et, de proposer les solutions techniques appropriées.

Au niveau de la gestion des matières putrescibles, notons que l'objectif de récupération est de 60 %. La politique vise non seulement à favoriser la valorisation de ces matières, mais elle agit positivement en réduisant les volumes de matières résiduelles enfouies. L'extrait suivant présente le double avantage de la réduction de l'enfouissement des matières putrescibles. Cette politique vise à permettre de maximiser l'utilisation des sites d'enfouissement et d'éviter l'aménagement de nouveaux sites qui sont difficiles et coûteux à implémenter. De plus, en évitant d'enfouir les matières organiques, la politique prévient la production de gaz explosifs, inflammables et malodorants qui sont générés lorsque certaines matières se dégradent en l'absence d'air, comme c'est le cas sur ces sites (Gazette officielle du Québec, 2000, p. 969).

Extrait du bilan intérimaire, la figure 23 montre l'écart à combler au niveau des matières putrescibles.



Figure 23 - Taux effectifs de récupération en 2000



Source : (MDDEP, 2002)

La lecture du bilan intérimaire de 2006 de la politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008 permet de dresser un portrait des diverses actions ainsi que d'en évaluer leur progression. Parmi les 29 actions proposées dans le cadre de cette loi, notons que 16 ont été réalisées, huit sont partiellement réalisées, deux sont en voie de réalisation et, que les trois dernières sont respectivement; en suspens, pas réalisée et ne pouvant être appliquées jusqu'à maintenant (MDDEP, 2006).

## 2.3 Contexte de recherche

Alors que la politique 1998-2008 arrive à échéance, plusieurs MRC n'ont pas atteint l'objectif de 60 % pour la récupération des matières putrescibles. En avril 2008, lors du lancement de son PGMR 2008-2012, la ville de Montréal annonce qu'elle n'est pas en mesure d'atteindre les objectifs de la Politique 1998-2008. En 2006, l'agglomération a recueilli 7 % des matières putrescibles. Selon son nouveau PGMR, la ville souhaite atteindre l'objectif de 60 % vers 2018.

L'implantation de la cueillette à trois voies représente un défi de taille pour les différentes MRC. Notons que les MRC Acton, Maskoutains et Sherbrooke possèdent une telle collecte. Or, la valorisation des matières putrescibles récupérées n'est pas nécessairement enclenchée.

### 2.3.1 Les acteurs

Cette étude comporte trois catégories d'acteurs. Les trois sous-sections suivantes introduisent et présentent les tensions qui s'exercent sur chacun d'eux : 1) les producteurs d'animaux, 2) la municipalité et 3) les citoyens.

### 2.3.2 La production animale

Notons que la production animale est très diversifiée au Québec. Les principaux acteurs sont les producteurs : laitiers, de bœufs, de poulets et de porcs. L'intensification de la production affecte les divers types de production. À l'intérieur de la globalisation des marchés et de l'augmentation des pressions que subissent les producteurs, le Québec est témoin de la concentration et de l'intensification de la production.

### 2.3.2.1 Gestion des déjections

En augmentant la taille des exploitations agricoles, les producteurs abandonnent la gestion du fumier sur solide pour adopter la gestion liquide sous forme de lisier. Ce faisant, les volumes des déjections augmentent et la gestion de ceux-ci devient plus préoccupante, et ce, non seulement à cause des normes d'épandage, de la cohabitation régionale, mais également à cause des législations qui ont pour but de protéger l'environnement. La gestion du phosphore, dans une optique de développement durable, représente un défi de taille pour les producteurs agricoles et, plus particulièrement, dans les zones qui possèdent des surplus de phosphore.

### 2.3.2.2 Temps d'arrêt

En 2002, le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) déclare un temps d'arrêt. Riche en phosphore, le lisier de porc est particulièrement problématique dans certaines régions soit les zones d'activités limitées (ZAL) établies par le BAPE. Dans ces régions, le volume des lisiers est supérieur à la capacité de captation des sols en fonction des superficies des terres d'épandage. Le respect de la norme phosphore devient dans certaines régions (ZAL) un problème majeur. En effet, les zones d'activités limitées (ZAL) détiennent un ratio phosphore/terres d'épandage supérieur à 1. Ainsi, avec l'entrée en vigueur progressive de la norme phosphore en trois phases (2005, 2008, 2010) certains producteurs craignent le pire.

### 2.3.2.3 Le passage à la norme phosphore

La production porcine, bien que hautement productive existe dans un équilibre de coûts fragiles (Lavoie, 2007). La gestion des déjections représente un coût d'opération grandissant (transport, distance, achat et location de terre d'épandage). L'application de la norme phosphore de 2008 et, 2010, risque de forcer certains producteurs à abandonner leurs activités. La réduction du nombre de tête par élevage ne constitue pas une avenue possible dans cette activité étant donné les économies d'échelles et d'envergures liées à la production. Le tableau 6 montre les effets de l'application de la norme phosphore en fonction des

objectifs supérieurs du règlement sur les exploitations agricoles du Québec. Ce règlement précise qu'en date du 1<sup>er</sup> avril le ratio de la capacité de disposition totale sur la charge totale en  $P_2O_5$  doit atteindre au moins 50 % pour 2005, entre 50 et 75 % pour 2008 et entre 75 et 100% pour 2010.

**Tableau 6 - Effets d'application de la norme phosphore**

Année	2005	2008	2010
Apport maximal de phosphore selon la capacité de captation des plantes	200 %	133 %	100 %

### 2.3.3 La municipalité régionale de comté

Au niveau des municipalités régionales de comté (MRC), notons que plusieurs tensions s'exercent. Elles sont de divers ordres : législatif, budgétaire, opérationnel et politique. Les paragraphes suivants expliquent les tensions présentes au cœur des MRC.

Au niveau législatif, les MRC se doivent de se plier à la Politique 1998-2008. Ce faisant, elles doivent élaborer le PGMR puis la mise en application de celui-ci. Au niveau des objectifs de la politique, les MRC font face à deux demandes. La première est la récupération de 60 % des matières putrescibles pour valorisation ultérieure. La seconde affecte la gestion des boues. En effet, la municipalité doit connaître la composition des boues qu'elle gère dans l'objectif de les valoriser.

Au niveau financier, notons que l'impact de cette politique est grand, d'abord pour la création du PGMR, mais plus largement dans son application. Changer les habitudes des citoyens nécessite temps et argent. Au niveau de la mise en œuvre du PGMR, notons les investissements suivants : formation et sensibilisation, achats de matériel et d'infrastructures puis la main-d'œuvre nécessaire à la réalisation.

Au niveau opérationnel, les MRC ne possèdent pas nécessairement le savoir-faire nécessaire à l'ensemble de la mise en œuvre du plan. Dans le cas des matières putrescibles, les infrastructures pour recueillir celles-ci sont inexistantes. Il est de même pour les bacs destinés à la collecte à trois voies.

Au niveau de la politique municipale, la gestion des MR revêt une importance certaine. La gestion des déchets et des sites d'enfouissement est un sujet de discordes entre les administrations et les citoyens. De plus, les municipalités comprennent de plus en plus les impacts environnementaux liés aux manques de gestion des matières résiduelles.

#### 2.3.4 Les citoyens

Dans le cadre de la récupération des matières putrescibles, le citoyen est un acteur important. Notons que celui-ci influence les résultats de par son devoir d'électeur et d'acteur dans la société. Il tient aussi le rôle de « producteur » de ces matières. Finalement il agit à titre de facilitateur en adoptant la cueillette sélective à trois voies.

Au niveau de la production des matières résiduelles, le citoyen est de plus en plus sensibilisé à l'impact de ces choix en tant que consommateur. La réduction à la source est un des principes directeurs de la Politique 1998-2008. Outre la réduction à la source, notons les initiatives de compostage résidentiel qui viennent réduire les volumes de matières putrescibles à récupérer.

En tant que facilitateurs, les citoyens sont les principaux intéressés de la collecte des bacs bruns, et ce, bien qu'ils ne soient pas directement impliqués dans son organisation. Notons que le lancement de la cueillette à trois voies ne se fait pas sans heurts. Toute adoption passe d'abord par la gestion de la peur du changement (Schermerthor, 2006).

Alors que la récolte des matières putrescibles ressemble à la récolte des ordures et des matières recyclables, elle se différencie de par la question des odeurs. En effet, les matières

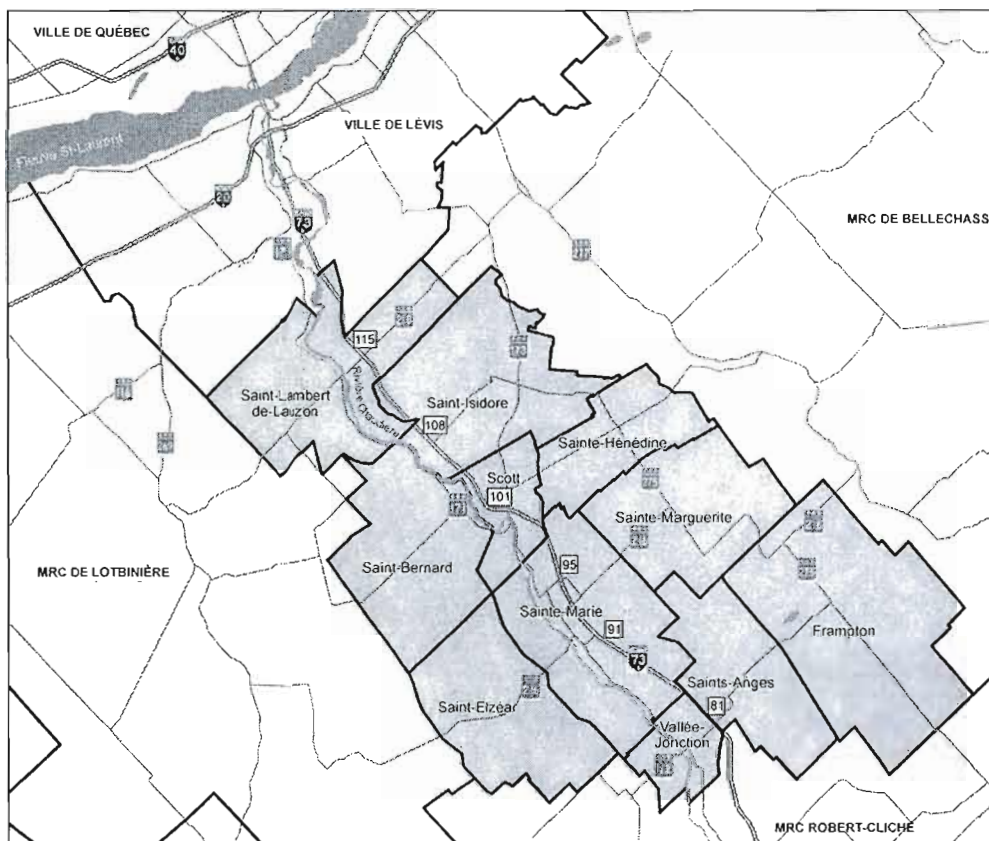
organiques contenues dans les bacs bruns ne sont pas ensachées, elles sont plutôt entassées dans un bac ventilé. Le citoyen doit donc nettoyer chaque semaine son bac durant la période estivale. Il faut souligner que certaines MRC ont débuté la cueillette des matières résiduelles en se concentrant exclusivement sur les résidus verts qui représentent une problématique moindre au niveau de la gestion des odeurs.

En conclusion, notons que de par son rôle la municipalité se doit de concilier les intérêts des acteurs. Cette tâche est, dans les régions dites agricoles, plus difficile, étant donné les frictions entre les citoyens et les producteurs d'animaux.

#### 2.4 Terrain de la recherche

Le terrain de la recherche choisi dans le cadre de cette étude exploratoire, est la Municipalité régionale de comté (MRC) de la Nouvelle-Beauce. Située dans la région de la Chaudière-Appalaches, la Nouvelle-Beauce repose dans la vallée de la rivière Chaudière. La figure 24 montre les onze municipalités qui forment la MRC.

**Figure 24 - MRC de la Nouvelle-Beauce et ses 11 municipalités**



Source : (www.nouvellebeauce.com, 2008)

Cette municipalité possède une forte concentration d'activités agricoles. Son territoire occupe 5 % de la région de la Chaudière-Appalaches et on y retrouve 14 % des fermes de la région. Ces mêmes fermes génèrent plus de 28 % des revenus agricoles de la région (MAPAQ, 2004). Ces principaux élevages sont : la production porcine (312 fermes), la production laitière (255 fermes), la production bovine (161 fermes) et la production avicole (62 fermes).

La concentration des activités d'élevage entraîne, avec le passage à la norme phosphore, une problématique grandissante des surplus de phosphore. Le MAPAQ estimait en 2007 un surplus de 2 687 161 Kg de phosphore selon la méthode du bilan de surface (MAPAQ, 2007). Cette problématique a eu pour effet de stopper la croissance de certaines activités telle la

production porcine. Alors que « la Nouvelle-Beauce mise notamment sur l'agroalimentaire pour assurer son développement économique et souhaite s'appuyer sur ses forces dans le secteur de transformation des viandes » (MAPAQ, 2007), il s'avère nécessaire de trouver des éléments de solution pour que le développement économique de la MRC, en constante croissance depuis 1981, puisse continuer dans le domaine des exploitations agroalimentaires.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, l'objet de l'étude a été présenté, ainsi que le terrain de recherche. Face à ces problématiques, les acteurs doivent agir et contribuer aux changements pour que la vision intégrée et les objectifs de la Politique 1998-2008 soient un jour atteints. Que ce soit au niveau des producteurs agricoles, des municipalités et des citoyens, notons que l'atteinte des objectifs prescrit par la loi s'inscrit dans une vision plus globale de protection de l'environnement et de développement durable (DD).

Certains pays scandinaves ont su développer des systèmes qui ont eu pour effet de réduire la quantité des matières résiduelles, tout en tirant le meilleur de celles-ci via la valorisation. À ce titre notons que la récupération des déchets est tarifée en fonction du poids dans certaines de ces régions. La méthanisation représente aussi dans ces pays une valorisation qui profite à l'ensemble de la communauté.



## CHAPITRE III

### MÉTHODE DE RECHERCHE

#### 3.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthode de recherche retenue pour répondre aux questions de recherche identifiées dans l'introduction. La section 3.2 présente le contexte de cette étude. L'approche de recherche est précisée à la section 3.3. Le processus de recherche est quant à lui décomposé en quatre étapes à l'intérieur de la sous-section 3.4. La dernière sous-section de ce chapitre présente un récapitulatif.

#### 3.2 Contexte de la recherche

La définition d'une méthode de recherche dépend de plusieurs facteurs. Notons la nature de l'étude, les orientations de recherches retenues et les historiques de recherche. La méthode de recherche de cette étude repose sur les principes de la dynamique des systèmes (DS). L'application de ces principes nécessite une méthode spécifique, telle que décrite dans la section 1.3. Avant de présenter les étapes de la recherche, notons qu'elle repose sur la participation d'experts qui ont fourni des informations, connaissances et données sur les différents aspects de la recherche. Le tableau 7 présente le rôle des acteurs qui ont collaboré à cette étude. La section 3.4.4 présente l'implication des collaborateurs dans la phase de calibrage du modèle de simulation niveaux-taux.

**Tableau 7 - Tableau descriptif des collaborateurs**

Catégorie de collaborateurs	Description	Professions reliées
Parties prenantes	Catégorie de collaborateurs avec qui l'équipe de recherche élabore et prépare l'ensemble du processus de la recherche.	Agronome Économiste Ingénieur
Conseillers experts	Catégorie de collaborateurs qui détiennent un savoir technique spécifique dans leur domaine d'expertise.	Agronome Chercheur Évaluateur agréé Ingénieur
Collaborateurs institutionnels (gouvernementaux)	Catégorie de collaborateurs qui, de par leur mission publique, a pour objectif de recueillir, d'interpréter et de diffuser le savoir à l'intérieur de leurs champs de spécialités.	Agronome Ingénieur
Leader d'opinion	Catégorie de collaborateurs qui, de par leur fonction, sont des leaders d'opinion dans leurs milieux respectifs.	Agriculteur Maire/Préfet
Consultants	Catégorie de collaborateurs privés qui évoluent dans un domaine de recherche semblable ou complémentaire à l'objet d'étude.	Analyste Ingénieur

La section suivante présente l'approche de recherche retenue dans le cadre de cette étude. Au niveau de la dynamique des systèmes, plusieurs experts ont contribué à l'élaboration des fondements de la méthode. Les réfractaires présentent les limites et des critiques sur la méthode. Les limites observées dans la littérature sont présentées à la section 4.4 du chapitre Élaboration et calibrage du modèle.

### 3.3 Approche de recherche

La dynamique des systèmes (DS) permet en deux temps de conceptualiser et de modéliser la réalité observée. Selon Leontief, « (...) la théorie n'a un sens que lorsqu'elle se rapproche de la réalité observée » (DeBresson, 2006).

Mayrand (2005) suivant Venix (1996) énonce :

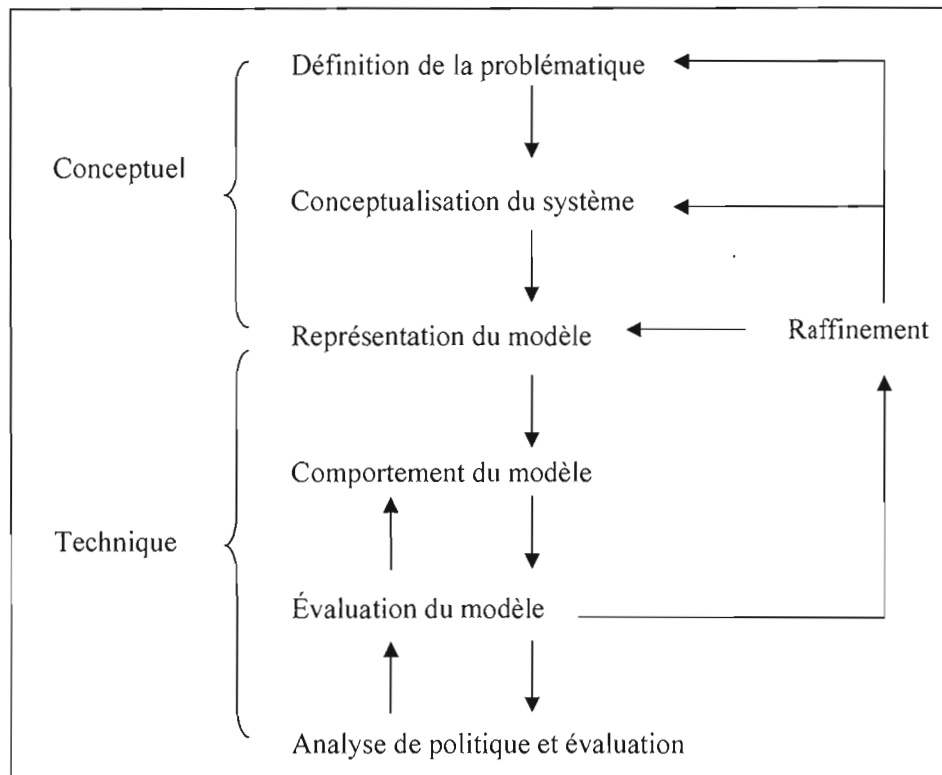
« Spécifiquement, la dynamique des systèmes est une méthode qui permet de susciter l'émergence, le développement et le partage des modèles mentaux entre les individus d'une équipe, qui seraient autrement tronqués par la rationalité limitée du décideur » (Mayrand, 2005; Venix, 1996).

Mayrand (2005) inspiré par Braunschweig (1984) écrit :

« Il a été prouvé maintes fois que la seule mise en forme d'un diagramme causal sur une feuille de papier peut faire comprendre à un décideur quels sont les points sensibles de son système, quelles sont les variables prédominantes et quelles sont celles que l'on peut négliger » (Mayrand, 2005; Braunschweig, 1984).

La conceptualisation et la réalisation d'un modèle de simulation par la dynamique des systèmes s'appuient sur une expertise au sujet d'un système. Ainsi, les étapes du schéma de la figure 25 montrent le processus itératif d'élaboration d'un modèle.

Figure 25 - Phases du processus de modélisation



(Source : Roberts et al., 1983, p. 8)

### 3.4 Processus de recherche

La section suivante présente les quatre étapes du processus de recherche. La première étape représente l'étude préliminaire. Suite à cette étape, on élabore le diagramme d'influence, le modèle niveaux-taux et les scénarios de recherche.

#### 3.4.1 Étude préliminaire

La première étape du processus de recherche comprend deux parties. La première partie concerne l'exploration des données. Cette étape est caractérisée par la cueillette de données nécessaires à la compréhension du système étudié. L'extraction d'informations permet de lier

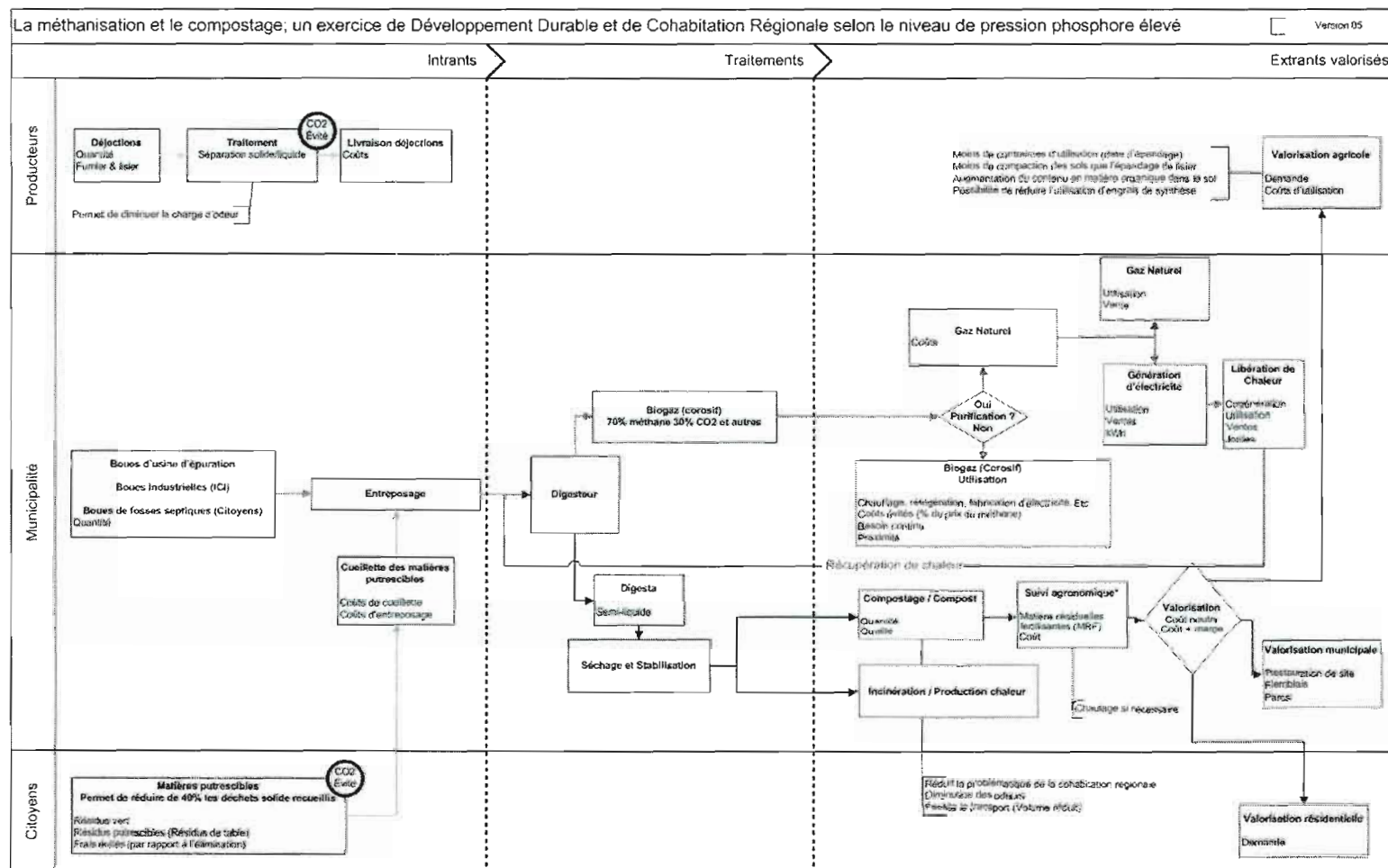
les variables dans un modèle en établissant les liens de cause et d'effet. Cette étape correspond à la schématisation du système. Le schéma causal de l'étude est représenté aux figures 26 et 27. Cette représentation simplifiée du système répond à deux usages distincts. Premièrement, il permet d'illustrer le système pour une première évaluation de ses frontières avec les parties prenantes. Ceci représente la première étape avant d'élaborer le diagramme d'influence (DI) du système. Deuxièmement, il permet de présenter le système de manière accessible aux différents acteurs et conseillers experts participant à la recherche. Ces personnes n'étant pas nécessairement familières avec les représentations caractéristiques de la DS. Ce second usage est particulièrement important pour communiquer et évaluer les représentations du système. Le but ultime de la recherche étant l'analyse et la présentation des résultats.

Le schéma du système comporte trois niveaux d'acteurs : les producteurs d'animaux, la municipalité et les citoyens. La figure 26 montre ces acteurs ainsi que les trois phases du système, soit la création des matières résiduelles, le processus de traitement et la valorisation des extrants. À la page suivante, figure 27, montre le modèle initial pour référence.

**Figure 26 - Acteurs et phases du système**

La méthanisation et le compostage; un exercice de Développement Durable et de Cohabitation Régionale selon le niveau de pression phosphore élevé			
		Intrants	Traitements
		Extrants valorisés	
Producteurs			
Municipalité			
Citoyens			

Figure 27 - Modèle initial



Les sections suivantes présentent les implications de chacune des parties selon le processus de valorisation des matières résiduelles par la digestion anaérobie. Tel que présenté sur le modèle initial, les trois sections suivantes montrent respectivement les intrants, le traitement et les extrants valorisés.

#### 3.4.1.1 Les intrants

Les déjections animales, premier intrant du système, proviennent des exploitations d'élevage. Elles sont composées principalement de lisier et de fumier. Il est de la responsabilité du producteur de veiller à l'épandage de ce fertilisant agricole tout en satisfaisant les différentes normes qui s'y rattachent. Or, si le producteur ne possède pas suffisamment de terres d'épandage, il doit louer d'autres terres où l'épandage restant pourra s'effectuer. Dans le cas de la MRC de la Nouvelle-Beauce, cette pratique est largement répandue. Il n'est pas rare que les producteurs doivent parcourir de longues distances parfois même à l'extérieur des frontières de la MRC pour épandre les lisiers. Dans ce cas, le producteur doit transporter les déjections, il peut choisir de traiter ou ne pas traiter les déjections pour en réduire le volume. Dans ce cas-ci, le producteur transporte les déjections vers les installations de la digestion anaérobie.

Le deuxième intrant du système représente les boues. Elles proviennent de trois sources distinctes : boues d'usines d'épuration, boues industrielles et boues de fosses septiques. Ces boues autrement incinérées ou enfouies seront valorisées par le système. Notons que la disposition des boues industrielles et des boues de fosses septiques sont à la charge du propriétaire. Dans le système étudié, les propriétaires utilisent déjà le service des firmes environnementales pour le ramassage et la prise en charge des boues. Au lieu de destiner les boues à l'incinérateur ou au site d'enfouissement, les boues seront valorisées par la digestion anaérobie.

Les matières putrescibles, troisième intrant du système, se composent de diverses matières soit : les résidus verts, les résidus de table et les matières inertes. Ces matières sont respectivement : 1) des résidus de feuilles et gazon, 2) des aliments non consommés et 3) les morceaux de bois et carton d'aliments souillés. Notons que la cueillette à trois voies n'est pas encore disponible sur le territoire de la Nouvelle-Beauce. Or, selon la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008, l'ensemble des MRC avait jusqu'en 2008 pour valoriser 60 % des matières putrescibles de son territoire. Ainsi, l'étude tiendra compte d'une adoption graduelle de la collecte des MP.

#### 3.4.1.2 Le traitement

L'ensemble des intrants constitue les matières résiduelles qui entrent dans le processus de la valorisation. Ces trois intrants permettent d'alimenter le digesteur du système étudié. Au niveau du traitement, l'ensemble des processus ont été centralisés au niveau de la municipalité, pour simplifier le système. Les partenariats publics/privés ainsi que l'entrepreneuriat privé constituent d'autres avenues possibles. Les réflexions sur la nature de la propriété des installations de digestion anaérobie sont plus spécifiquement liées à la phase de mise en œuvre plutôt qu'à la présente étude préliminaire.

L'élément principal du processus de traitement est le digesteur anaérobie. Le type de digesteur retenu est un digesteur mixte d'une capacité de 3500 m<sup>3</sup>. Le marché actuel ne fournit pas de digesteurs plus volumineux. Par conséquent, le système étudié se compose de plusieurs digesteurs qui seront successivement ajoutés selon l'augmentation du volume des matières résiduelles à traiter.



### 3.4.1.3 Les extrants

Suivant la digestion, deux sous-produits sont créés à même les matières résiduelles traitées : 1) le biogaz et 2) le digesta. Le biogaz est composé d'environ 70 % de méthane et de 30 % d'autres substances. Le second sous-produit est le digesta. Il s'agit d'une boue liquide qui contient les éléments digérés qui restent suivant la digestion.

Au niveau du biogaz, il existe plusieurs débouchés commerciaux: 1) le brûler, 2) l'utilisation telle quelle, 3) l'utilisation du biogaz purifié. La première option est moins intéressante puisqu'elle ne permet pas de créer des retombées économiques. Notons que 10 % du biogaz doit être brûlé, il s'agit d'un mécanisme de sécurité lié à la digestion anaérobie. La seconde option, l'utilisation sans purification permet : a) d'être utilisé avec un système adapté, donc traité contre la corrosion, b) d'être utilisé dans des applications thermiques puisque celles-ci ne nécessitent pas d'adaptation contre la corrosion ou c) de servir d'agent de remplacement dans une proportion de moins de 10 % dans n'importe quelle application de gaz naturel, par exemple. La troisième avenue est la purification du gaz pour vente ou utilisation régulière. Suite au processus de purification, il est possible de vendre le biogaz purifié au même titre que le gaz naturel à des entreprises voisines. Le prix du marché pour le biogaz est inférieur au prix du gaz naturel, ainsi il est plus avantageux d'utiliser d'abord le biogaz et de vendre le surplus uniquement. Toujours avec le gaz purifié, il est possible à l'aide de moteurs électriques à cogénération de créer électricité et chaleur, lesquels, à leurs tours peuvent être utilisés ou vendus. Une partie de cette chaleur libérée peut servir pour chauffer le digesteur anaérobie aux 55°C requis pour une utilisation optimale.

Après la déshydratation mécanique, le digesta peut soit être incinéré, soit transformé en compost. L'avantage du compost est que cette solution entraîne moins de coûts que l'incinération, crée un revenu potentiel et crée une valeur ajoutée. Le suivi agronomique est une étape nécessaire pour contrôler les niveaux de pathogènes et de métaux lourds présents. Le compost a l'avantage de fournir des matières organiques. Il peut être valorisé par chacun des niveaux d'acteurs soit : les producteurs agricoles, la municipalité et les citoyens.

### 3.4.2 Élaboration du diagramme d'influence (DI)

En DS, la création du DI constitue une étape en amont du modèle de simulation niveaux-taux. Cette étape, axée sur la représentation qualitative de la structure du système, constitue le point d'ancrage sur lequel la modélisation prendra place. Le DI présenté a été modifié suite aux commentaires des parties prenantes et des conseillers experts. Le processus d'évaluation du DI s'est fait de façon itérative avec les divers intervenants consultés dans le cadre de la recherche. Le descriptif méthodologique portant sur les DI est présenté au chapitre 1, section 1.3.2. Le DI du système étudié est présenté au chapitre 4 dans le cadre de cette recherche.

### 3.4.3 Élaboration du modèle de simulation niveaux-taux

Lors de la réalisation du modèle niveaux-taux (N-T), le processus repose sur le cadre conceptuel de la figure 22 présenté au chapitre 1. Cette représentation N-T s'opère avec le logiciel Powersim. Ce logiciel permet de traduire les boucles de rétroaction qualitatives du DI et de les quantifier. En effet, le modèle de simulation N-T permet d'étudier le système tout en variant les éléments qui le composent. Cet outil, lorsque calibré, permet de cibler des réactions insoupçonnées dans le fonctionnement du système, d'identifier l'influence de la structure sur le système lui-même et d'étudier des hypothèses sur le comportement du système selon diverses pressions présentes dans l'environnement et le temps.

#### 3.4.4 Scénarios de recherche

L'avantage premier de la DS est d'offrir aux chercheurs la possibilité de poser des questions afin de tester diverses hypothèses. Dans le cadre de cette étude, deux scénarios sont proposés afin de répondre aux questions de recherche formulées dans l'introduction.

Le premier scénario offre une vision propre au premier intrant du système, soit les déjections animales. L'étude de la collaboration des producteurs est préalable au scénario B qui englobe l'ensemble du système. Dans le cadre de cette étude de cas, la collaboration de la municipalité, à la fois responsable de la gestion des boues et des matières putrescibles, est hypothétiquement assurée puisque initiatrice du projet de valorisation par digestion anaérobie.

Dans le scénario A, le modèle étudie le point de vue d'un producteur porcin. Il s'agit de mesurer l'impact de sa participation au projet de digestion anaérobie au niveau des coûts. Ce scénario permet entre autres d'évaluer le potentiel de collaboration des différents producteurs de la région. Sensibles aux coûts d'opération, dans un équilibre de coûts fragiles, ces coûts de participation ne peuvent augmenter leurs frais d'exploitation.

Le scénario B, offre une simulation globale du système. À l'aide du modèle de simulation élaboré, ce scénario permet de voir dans le temps, selon des vitesses d'adoption variables, l'ampleur du système simulé.

#### 3.4.5 Calibrage du modèle

Au niveau du calibrage du modèle, la consultation d'experts a été rendue nécessaire. Le tableau 8 est complété par le tableau 9 qui montre les rôles et le degré de participation des divers acteurs. Au niveau de la consultation pour la cueillette des données de recherche, le mécanisme de concertation est présenté à la section 5.1.1 du chapitre démarche de calculs de recherche.

**Tableau 8 - Les rôles des collaborateurs**

Catégorie de collaborateurs	Rôles	Participation
Parties Prenantes	Au niveau de la méthode de recherche, ces collaborateurs ont été consultés à maintes reprises pour s'assurer de l'exactitude des modèles présentés.	En continu 06/06-12/08
Conseillers experts	C'est avec ces collaborateurs que l'équipe de recherche confirme ou infirme les modèles en plus d'obtenir des informations techniques nécessaires à la complétion de l'étude.	Demande sporadique 06/07-04/08
Collaborateurs institutionnels (gouvernementaux)	Cette catégorie de partenaires est principalement fournisseur de données.	Demande sporadique 11/07-02/08
Leader d'opinion	Cette catégorie de collaborateurs est rencontrée afin de vérifier la validité des hypothèses émises ainsi que des solutions proposées dans le cadre de cette recherche.	Demande sporadique 08/07
Consultants	Les consultants ayant développé des savoirs-faire ainsi que les outils de mesure liés aux divers mandats clients leur permettent de jouer un rôle critique au niveau des données recueillies.	Demande de vérification 04/08-11/08

### 3.5 Évaluation du modèle

Selon Randers (1980, p. XVIII), la DS possède deux objectifs communs outre la prédiction : il s'agit d'améliorer la compréhension d'un phénomène observé et d'établir les conséquences générales des différentes options possibles face à la prise de décision. L'objectif du modèle doit nécessairement transparaître dans l'évaluation de sa performance. L'auteur propose neuf caractéristiques de modèles désirables. Le tableau 9 présente celles-ci.

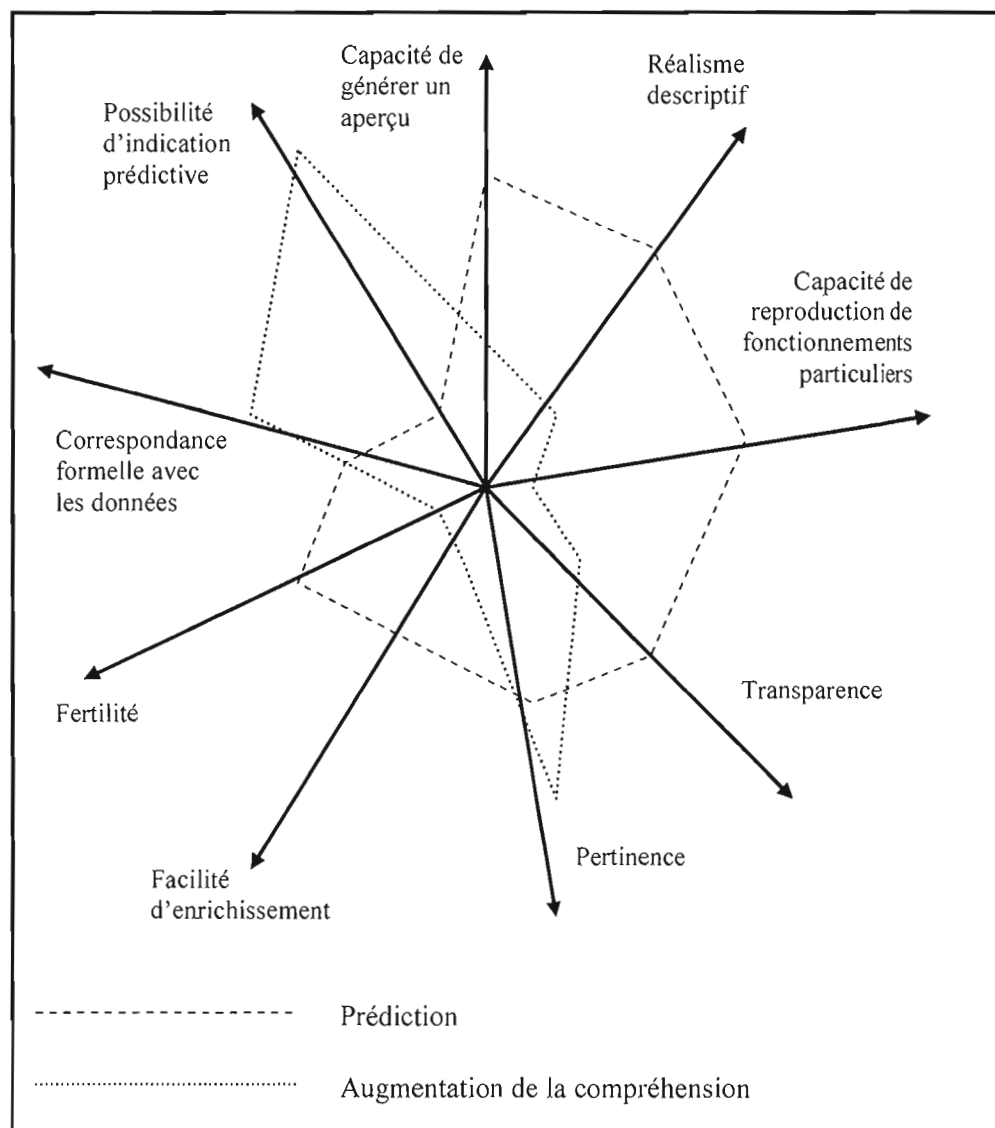
Tableau 9 - Descriptions des objectifs du modèle

Caractéristiques d'origines Traduction	Traduction libre ...
<i>Insight generating capacity</i> Capacité de générer un aperçu	Est-ce que le modèle augmente le niveau de compréhension du système modélisé? Améliore-t-il les modèles mentaux du créateur du modèle ou de ses clients? Le modèle produit-il des effets surprises qui semblent évidents après?
<i>Descriptive realism</i> Réalisme descriptif	Est-ce que les composantes et les équations du modèle représentent de près le système réel sous une forme qui correspond à ce que les personnes qui l'ont expérimenté le perçoivent. Est-ce que chaque paramètre ou éléments sont facilement perçus ou envisageables dans le monde réel?
<i>Mode reproduction ability</i> Capacité de reproduction de fonctionnements particuliers	Est-ce que le modèle reproduit des comportements dynamiques observables dans le vrai système? Et ce, sous les mêmes conditions présentes dans le vrai système?
<i>Transparency</i> Transparence	Est-ce que le modèle est facilement compréhensible par un auditoire non professionnel? Est ce que le modèle souligne les structures essentielles du vrai système de façon accessible?
<i>Revalence</i> Pertinence	Est-ce que le modèle aborde les problématiques connues de manière aussi importante que les personnes expérimentées qui œuvrent dans le vrai système?
<i>Ease of enrichment</i> Facilité d'enrichissement	Est-ce que le modèle peut être modifié afin d'incorporer de nouveaux éléments ou bien pour tester les effets de nouvelles politiques qui n'étaient pas considérées lors de la création du modèle? Est-ce que le modèle peut être adapté pour représenter un système semblable mais non identique au système original? Est-ce que le modèle peut être mis à jour sans reprendre l'ensemble du travail lié à sa création?
<i>Fertility</i> Fertilité	Est-ce que le modèle peut générer de nouvelles idées, de nouvelles façons de voir le problème, de nouvelles expériences ou nouvelles politiques qui peuvent avoir été négligées en l'absence de modèle?
<i>Formal corresponance with data</i> Correspondance formelle avec les données	Est-ce que le modèle incorpore des observations du monde réel incarné des sources de données standard et peut-il reproduire sous des conditions historiques des résultats semblables aux données historiquement connues?
<i>Point predictive ability</i> Possibilité d'indication prédictive	Est-ce que le modèle produit des prédictions précises sur le futur ou sur l'ampleur future d'éléments importants présents dans le système.

Source : traduit de (Randers, 1980, p.xviii-xix)

L'évaluation du modèle consiste à évaluer la capacité du modèle à appréhender le comportement du système. Pour ce faire, Randers (1980) propose d'évaluer la qualité du modèle selon les objectifs précédemment énoncés. La figure 28 montre les caractéristiques désirables d'un modèle en fonction des objectifs de prévision ou de l'augmentation de la compréhension.

**Figure 28 - Le modèle étoile des caractéristiques désirables d'un modèle**



(Randers, 1980, p. xx)

Sterman (2000) quant à lui propose une autre méthode afin d'évaluer un modèle. Alors que la littérature utilise largement le terme validation, Sterman débute son chapitre sur la validation par une mise en garde. Le chapitre *Truth and Beauty : Validation and Model Testing* prévient les lecteurs que dans le cadre de la dynamique des système, à l'instar d'autres approches de modélisation, la validation ou la vérification d'un modèle est une impossibilité (Sterman, 2000). C'est d'ailleurs ce que Forrester avait autrement énoncé en 1961 : « Tout « objectif » de procédure de validation d'un modèle sera éventuellement réduit à un jugement ou une confiance que soit la procédure ou son objectif est acceptable sans preuves objectives » (Sterman, 2000, p.123).

Avant de continuer sur les tests suggérés par Sterman, il est important de comprendre en quoi les modèles ne sont pas vérifiables de façon empirique. Tel que présenté au chapitre 1, dans la revue de la littérature, la DS repose sur la modélisation des cadres mentaux des acteurs du système. Sous la forme de modèle, le système est simplifié et, par conséquent, ne représente plus la complexité initiale du système. Alors que cette simplification augmente la compréhension de l'utilisateur sur le système, la représentation sous forme de modélisation requiert un certain niveau de perte de détails. Dans ce cas, Sterman (2000, p. 846) va même jusqu'à dire que l'ensemble des modèles sont faux. Or, il est de la responsabilité du chercheur et de l'utilisateur de comprendre les limites d'un modèle et de choisir le meilleur modèle selon l'utilisation prévue pour celui-ci. Greenberger et al. (1976, p. 70-71) notaient : « Aucun modèle n'a été ou ne sera complètement validé... « utile, » « instructif », « convaincant », ou « inspirant confiance » seraient des descriptifs plus appropriés que « valide » pour s'appliquer aux modèles » (Sterman, 2000).

Ainsi, Sterman (2000, p. 846) propose aux chercheurs utilisant la DS de tester leurs modèles dans le but de comprendre leurs limitations et de les améliorer pour ultimement utiliser le meilleur modèle disponible pour les assister dans leurs prises de décision.

Inspiré du réfutationnisme, Sterman propose 12 tests inspirés de ceux que Forrester et Senge ont proposé (1980). Ces procédures permettent de déceler soit des erreurs présentes dans les modèles, soit leurs limites. Cela permet également de juger de la pertinence du modèle pour l'usage prévu de celui-ci. L'auteur suggère aux modélisateurs de documenter l'ensemble des

étapes qui composent la création du modèle. D'abord dans un but de reproduction possible, mais également pour permettre aux futurs chercheurs de s'appuyer sur une base existante dans le but d'enrichir le modèle. C'est ce que l'on nomme l'historique de recherche. La présence de variables auxiliaires doit également être documentée. Ces variables servent à protéger les théories des confrontations avec des données défavorables (Stermann, 2000, p.848).

« La validation est aussi intrinsèquement sociale. Le but de la modélisation, et de l'aventure scientifique plus généralement, est de construire une compréhension partagée qui fournit un aperçu sur le monde et qui aide à solutionner des problèmes importants » (Stermann, 2000, p. 850).

Dans le cadre de cette recherche, quatre tests proposés par Sterman sont choisis. Il s'agit du test des frontières, de l'évaluation de la structure, du test des conditions extrêmes ainsi que de l'examen des paramètres. Le tableau 10 montre, dans le cadre de cette recherche, l'utilité des tests proposés par les chercheurs.



**Tableau 10 - Tests de validation du système**

Test	L'objet du test
Test des frontières	<p>Est-ce que les concepts importants sont endogènes au modèle?</p> <p>Est-ce que le comportement du modèle change significativement quand les frontières du modèle changent?</p> <p>Est-ce que les recommandations changent lorsque les frontières du modèle sont élargies?</p>
Évaluation de la structure	<p>Est-ce que la structure du modèle est consistante avec le savoir descriptif du modèle?</p> <p>Est-ce que le niveau d'agrégation est approprié?</p> <p>Est-ce que le modèle se conforme aux lois universelles telle que : la loi de la conservation?</p> <p>Est-ce que le modèle permet de répliquer le comportement des acteurs dans le système?</p>
Test des conditions extrêmes	<p>Est-ce que chaque équation fait du sens même lorsque les intrants prennent des valeurs extrêmes?</p> <p>Est-ce que le modèle répond de façon plausible lorsque sujet à des politiques, chocs et paramètres extrêmes?</p>
Test d'estimation des paramètres	<p>Est-ce que les valeurs des paramètres sont consistantes avec les données descriptives et numériques correspondantes aux connaissances du système?</p> <p>Est-ce que l'ensemble des paramètres ont un équivalent dans un système réel?</p>

Source : (Stermann, 2000, p.859-860)

### 3.6 Synthèse

Dans ce chapitre, la méthode de recherche a été présentée. Afin de situer le lecteur dans sa compréhension du système, une première représentation du système à modéliser a été présentée. Le chapitre suivant présente et élabore la création du diagramme d'influence et du modèle niveaux-taux issus de la dynamique des systèmes.

## CHAPITRE IV

### ÉLABORATION ET CALIBRAGE DU MODÈLE

#### 4.1 Introduction

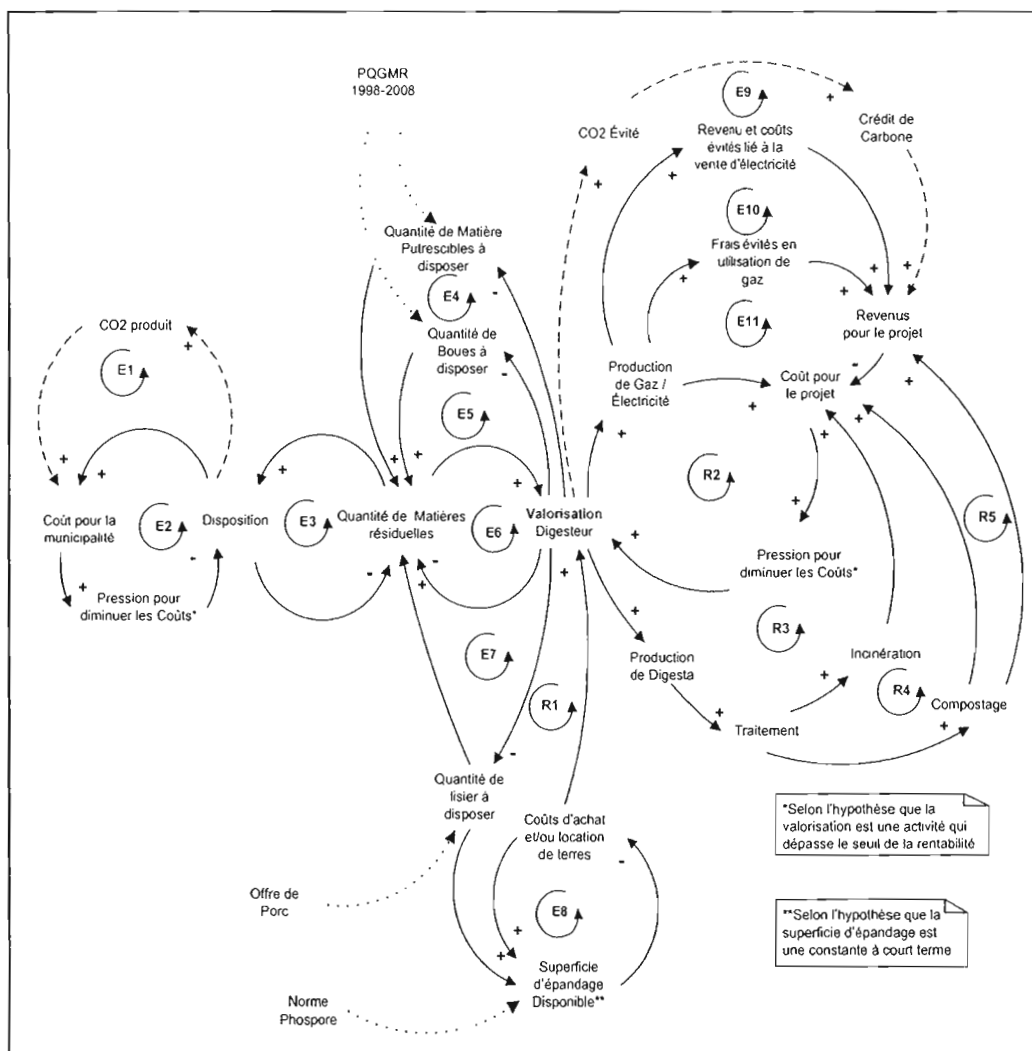
Ce chapitre présente la démarche d'élaboration du modèle en deux étapes. La première est une représentation qualitative du système étudié en 4.2. Il s'agit de la création du diagramme d'influence. La seconde étape, quant à elle quantitative, représente la création du modèle de simulation utilisé pour obtenir les résultats de recherche. Cette étape est montrée en 4.3. Le calibrage du modèle niveaux-taux est présenté en 4.4. La section 4.5 présente les scénarios de recherche.

#### 4.2 Élaboration du diagramme d'influence

L'élaboration du diagramme d'influence (DI) est la première étape vers la modélisation dans le cadre de la dynamique des systèmes. Au plan qualitatif, cette étape permet aux chercheurs de mettre en évidence les relations et les influences présentes dans un système. Cette étape permet de délimiter les frontières du système à l'étude. La figure 31 présente l'objet de recherche sous forme de DI.

Chacune des boucles présentes à la figure 29 constitue des rétroactions identifiées dans le système. La présentation de l'ensemble des boucles est faite à la section 4.2.1. La présentation de ces boucles de renforcements figure aux tableaux 11 et 12 de la section 4.2.2. La présentation des boucles d'équilibrage est citée aux tableaux 13, 14 et 15 de la section 4.2.3.

Figure 29 - Diagramme d'influence du système



Dans le DI de la figure 29, les lignes pointillées présentent les pressions qui s'exercent sur le modèle et qui proviennent du macroenvironnement. Les lignes de tirets illustrent la dynamique des crédits de carbone. Il est pertinent de présenter cet élément dans le DI malgré son absence dans l'étape subséquente liée à la modélisation dans le modèle niveaux-taux. Le DI d'un système complexe contient de nombreuses boucles. Certaines sont des boucles d'équilibrage et les autres des boucles de rétroactions. La typologie des boucles et des vecteurs est présentée à la section 1.3.2.1 du chapitre 2. La section suivante présente chacune d'elles.

#### 4.2.1 Description des boucles

La boucle E1 montre que la disposition des déjections entraîne la libération de CO<sub>2</sub>, ce qui, dans une dynamique des taxes sur le carbone, entraîne des coûts supplémentaires pour la municipalité. Via le budget limité des municipalités, ces coûts créent une pression pour les éviter. Cette volonté de diminution de coûts affecte donc la disposition.

Dans le cadre de cette étude, les boucles E1 et E9 ne sont pas nécessairement représentées dans le modèle niveaux-taux présenté à la section 4.3 puisque la dynamique de la bourse du carbone au Canada n'est pas encore enclenchée et que ceci est hors de l'étendue de la présente étude. Lors de la rédaction de cette étude, l'ajout de ces deux boucles semblait pertinent dans l'optique du lancement de la bourse du carbone.

La boucle E2 montre la dynamique de coûts reliés à la disposition. La disposition augmente les coûts pour la municipalité; ce qui crée une pression pour diminuer les coûts.

La boucle E3 montre la relation directe entre la quantité de matières résiduelles et la disposition. Plus il y a de matières résiduelles, plus cela entraîne de la disposition. Celle-ci entraîne la réduction de la quantité de matières résiduelles.

La boucle E4 montre que la quantité de matières putrescibles à disposer entraîne l'augmentation des quantités de matières résiduelles qui affectent la valorisation. La valorisation permet de diminuer la quantité de matières putrescibles à disposer. Ce qui agit sur les volumes à valoriser. Ce qui vient diminuer la quantité de matières putrescibles à disposer.

La boucle E5 montre que la quantité de boues à disposer entraîne l'augmentation des quantités de matières résiduelles qui affecte la valorisation. La valorisation permet de diminuer la quantité de matières putrescibles à disposer, ce qui agit sur les volumes à valoriser. Ceci ultimement vient diminuer la quantité de boues à disposer.

De façon similaire à la boucle E3, la boucle E6 montre que la quantité de matières résiduelles affecte le niveau de valorisation potentielle. Dans le cadre de cette étude, la valorisation s'effectue via la digestion anaérobie à l'intérieur d'un digesteur.

La boucle E7 montre que la quantité de lisier à disposer entraîne l'augmentation des quantités de matières résiduelles qui affectent la valorisation. La valorisation permet de diminuer la quantité de matières putrescibles à disposer, ce qui agit sur les volumes à valoriser. Ceci ensuite vient diminuer la quantité de déjections à disposer.

La boucle R1 montre que la quantité de déjections à disposer fait diminuer les superficies d'épandage disponibles à court terme. Les superficies d'épandage disponibles affectent négativement le prix d'achat ou de location des terres d'épandage. Le prix d'achat ou de location des terres d'épandage affecte positivement la valorisation. La valorisation vient diminuer la quantité de déjections à disposer.

La boucle E8 montre que le coût d'achat ou de location de terres affecte positivement les superficies d'épandage disponibles. Évidemment, il existe un délai pour l'ajout de superficies d'épandage. Les superficies d'épandage affectent négativement le prix d'achat ou de location des terres.

La boucle E9, comme la boucle E1, montre la dynamique de la bourse du carbone sur le CO<sub>2</sub> évité. Tel que présenté plus tôt, le modèle niveaux-taux ne tient pas compte de l'aspect CO<sub>2</sub> évité. Or, la boucle montre que la valorisation crée du CO<sub>2</sub> évité qui lui apporte des crédits de carbone. Ces crédits affectent positivement les revenus pour le projet qui diminue les coûts. Les coûts pour le projet affectent positivement la pression pour les diminuer. Ceci est vrai lorsque la valorisation engendre des profits. Cette pression agit positivement sur la valorisation.

Les boucles E10 et E11 montrent que la valorisation produit du gaz et/ou de l'électricité. Ces productions créent respectivement revenus et coûts évités liés à la vente d'électricité et de gaz. Ceci affecte positivement les revenus pour le projet. Cela diminue les coûts pour le

projet. Les coûts pour le projet affectent positivement la pression pour diminuer les coûts. Cette pression agit positivement sur la valorisation.

La boucle R2 montre que la valorisation crée du gaz et de l'électricité. Cette production crée des coûts supplémentaires qui affectent positivement les coûts pour le projet. Ces coûts affectent positivement la pression pour diminuer les coûts. Cette pression agit positivement sur la valorisation.

La boucle R3 et R4 montre la valorisation produite du digesta. Ces sous-produits de la digestion affectent positivement en R3 l'incinération et/ou en R4 le compostage. Ces deux traitements engendrent des coûts pour le projet. La boucle R5 ajoute au compostage les revenus de la vente de cet extrant valorisé. Ces revenus viennent diminuer le coût pour le projet. Les trois boucles R3, R4 et R5 se terminent lorsque les coûts pour le projet viennent augmenter la pression pour diminuer les coûts et incidemment favoriser la valorisation.

#### 4.2.2 Boucles de renforcement

Les tableaux 11 et 12 montrent les boucles de renforcement présenté dans le DI de la figure 29.

**Tableau 11 - Boucles de renforcement I**

R1	Cette boucle illustre l'effet de la valorisation des déjections à disposer selon la dynamique de l'offre et de la demande pour les terres d'épandage.
	<p>Les cinq influences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation affecte (-) à la quantité de lisier à disposer</li> <li>• quantité de lisier à disposer affecte (+) superficie d'épandage nécessaire</li> <li>• superficie d'épandage nécessaire affecte (+) superficie d'épandage disponible</li> <li>• superficie d'épandage disponible affecte (-) coûts d'achat et/ou de location de terres</li> <li>• coûts d'achat et/ou de location de terres affecte (+) valorisation</li> </ul>
R2	Cette boucle montre l'effet des coûts de production dans le système
	<p>Les quatre influences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation affecte (+) production de gaz/électricité</li> <li>• production de gaz/électricité affecte (+) coûts pour le projet</li> <li>• coûts pour le projet affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (+) valorisation</li> </ul>
R3	Cette boucle illustre l'effet de la production de l'incinération du digesta
	<p>Les six influences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation affecte (+) production de digesta</li> <li>• production de digesta affecte (+) traitement</li> <li>• traitement affecte (+) incinération</li> <li>• incinération affecte (+) coûts pour le projet</li> <li>• coûts pour le projet affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (+) valorisation</li> </ul>
R4	Cette boucle illustre l'effet de production de compost sur les coûts
	<p>Les six influences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation affecte (+) production de digesta</li> <li>• production de digesta affecte (+) traitement</li> <li>• traitement affecte (+) compostage</li> <li>• compostage affecte (+) coûts pour le projet</li> <li>• coûts pour le projet affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (+) valorisation</li> </ul>



**Tableau 12 - Boucles de renforcement II**

R5	Cette boucle illustre les revenus liés à la production de compost dans le système
	Les six influences : <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation affecte (+) production de digesta</li> <li>• production de digesta affecte (+) traitement</li> <li>• traitement affecte (+) compostage</li> <li>• compostage affecte (+) revenus pour le projet</li> <li>• revenus pour le projet affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (+) valorisation</li> </ul>

#### 4.2.3 Les boucles d'équilibrage

Les tableaux 13, 14 et 15 montrent les boucles d'équilibrage du DI présenté à la figure 29.

**Tableau 13 - Boucles d'équilibrage I**

E1	Cette boucle illustre les effets de la production du CO <sub>2</sub> du à la disposition pour la municipalité
	<p>Les quatre influences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• disposition affecte (+) CO<sub>2</sub> produit</li> <li>• CO<sub>2</sub> produit affecte (+) coûts pour la municipalité</li> <li>• coûts pour la municipalité affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (-) disposition</li> </ul>
E2	Cette boucle illustre l'effet des coûts de disposition pour la municipalité
	<p>Les trois influences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• disposition affecte (+) coûts pour la municipalité</li> <li>• coûts pour la municipalité affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (-) disposition</li> </ul>
E3	Cette boucle illustre le lien entre production de matières résiduelles et disposition
	<p>Les deux influences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• quantité de matières résiduelles affecte (+) disposition</li> <li>• disposition affecte (-) quantité de matières résiduelles</li> </ul>
E4	Cette boucle illustre le lien entre la valorisation et la quantité de matières putrescibles à disposer
	<p>Les trois influences :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation digesteur affecte (-) quantité de matières putrescibles à disposer</li> <li>• quantité de matières putrescibles à disposer affecte (+) quantité de matières résiduelles</li> <li>• quantité de matières résiduelles affecte (+) valorisation digesteur</li> </ul>

**Tableau 14 - Boucles d'équilibrage II**

E5	Cette boucle illustre le lien entre la valorisation et la quantité de boues à disposer
	Les trois influences : <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation digesteur affecte (-) quantité de boues à disposer</li> <li>• quantité de boues à disposer affecte (+) quantité de matières résiduelles</li> <li>• quantité de matières résiduelles affecte (+) valorisation digesteur</li> </ul>
E6	Cette boucle illustre le lien entre valorisation et quantité de matières résiduelles
	Les deux influences : <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation digesteur affecte (-) quantité de matières résiduelles</li> <li>• quantité de matières résiduelles affecte (+) valorisation digesteur</li> </ul>
E7	Cette boucle illustre le lien entre la valorisation et la quantité de déjections à disposer
	Les trois influences : <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation digesteur affecte (-) quantité de déjections à disposer</li> <li>• quantité de déjections à disposer affecte (+) quantité de matières résiduelles</li> <li>• quantité de matières résiduelles affecte (+) valorisation digesteur</li> </ul>
E8	Cette boucle illustre la dynamique de l'offre et de la demande au niveau des terres d'épandage
	Les deux influences : <ul style="list-style-type: none"> <li>• coûts d'achat et/ou location de terres affectent (+) superficie d'épandage disponible</li> <li>• superficie d'épandage disponible affecte (-) coûts d'achat et/ou location de terres</li> </ul>
E9	Cette boucle illustre les effets du CO <sub>2</sub> évité sur la structure de coûts du projet
	Les six influences : <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation affecte (+) CO<sub>2</sub> évité</li> <li>• CO<sub>2</sub> évité affecte (+) crédit carbone</li> <li>• crédit carbone affecte (+) revenus pour le projet</li> <li>• revenus pour le projet affecte (-) coûts pour le projet</li> <li>• coûts pour le projet affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (+) valorisation</li> </ul>

**Tableau 15 - Boucles d'équilibrage III**

E10	Cette boucle illustre les effets de la production d'électricité sur la structure de coûts du projet
	Les six influences : <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation affecte (+) production de gaz/électricité</li> <li>• production de gaz/électricité affecte (+) revenus et coûts évités liés à la vente d'électricité</li> <li>• revenus et coûts évités liés à la vente d'électricité affecte (+) revenus pour le projet</li> <li>• revenus pour le projet affecte (-) coûts pour le projet</li> <li>• coûts pour le projet affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (+) valorisation</li> </ul>
E11	Cette boucle illustre les effets de la production de gaz sur la structure de coûts du projet
	Les six influences : <ul style="list-style-type: none"> <li>• valorisation affecte (+) production de gaz/électricité</li> <li>• production de gaz/électricité affecte (+) revenus et coûts évités liés à la vente de gaz</li> <li>• revenus et coûts évités liés à la vente de gaz affecte (+) revenus pour le projet</li> <li>• revenus pour le projet affecte (-) coûts pour le projet</li> <li>• coûts pour le projet affecte (+) pression pour diminuer les coûts</li> <li>• pression pour diminuer les coûts affecte (+) valorisation</li> </ul>

Le système étudié est composé d'intrants, d'un processus de transformation ainsi que d'extrants qui varient selon les scénarios testés. La section suivante présente le processus d'élaboration du modèle niveaux-taux.

#### 4.3 Présentation des variables du système

Cette section montre les éléments du système niveaux – taux tel que présenté à l'annexe 4. Les équations du modèle sont présentées à la section 4.4. Le dictionnaire des variables est présenté en annexe 3.

#### 4.3.1 Les intrants

Au niveau des intrants, notons que le système est provisionné par trois types de matières soit : les déjections animales, les boues et les matières putrescibles.

L'intrant *Déjections animales* se compose du cumul des fumiers et lisiers des principaux élevages soit : bovins, porcins, ovins ainsi que les volailles. Au niveau du modèle niveaux-taux, les estimations des déjections animales ont été mesurées en fonction d'un estimé de l'inventaire des productions animales. Le calcul du volume des déjections annuelles est selon les moyennes des déjections par animal et, des inventaires de ceux-ci. Notons que la variable de niveau *Déjections annuelles* est liée aux deux variables de taux suivantes : *Taux utilisation agronomique déj* et *Taux valorisation exportation déj*. La première représente l'utilisation sur site des déjections animales. À titre d'exemple, citons l'utilisation des déjections comme fertilisants agricoles. Ce taux est lié aux variables suivantes : *Besoins agronomique MRC* et *Norme  $P_2O_5$* . Ces deux variables contraignent le modèle selon la sévérité de l'application de la norme phosphore. Quant au *Taux valorisation exportation déj*, il représente le pourcentage des déjections destinées à la valorisation ou à l'exportation. La variable de niveau *Déjections à valoriser* est également liée à deux variables de taux soit : *Taux exportation hors MRC* et *Taux valorisation déjections*. La première représente le pourcentage des *Déjections à valoriser* qui seront exportées hors MRC. Le *Taux valorisation déjections* représente les *Déjections à valoriser* qui sont destinées à la digestion anaérobie.

L'intrant *Matières Putrescibles (MP)* représente la collecte des résidus compostables. Cette cueillette (3<sup>e</sup> voie) s'effectue à l'aide des bacs bruns qui contiennent résidus de tables, composés de papier et de carton souillés, ainsi que les résidus verts. *Le taux de récupération MP* est fonction de *Production MP*. Il est influencé par l'*Objectif Récup MP* soit l'objectif de récupération des matières putrescibles de la Politique 1998-2008. Ces matières composent la variable de niveau MP. Celle-ci est influencée par deux taux : le *Taux d'élimination MP* et le *Taux récupération MP*. Ces deux variables de taux sont liées via le facteur *FEV MP*. Ce facteur permet de faire basculer les MP entre l'élimination et la récupération. Les MP à

*valoriser* représentent les matières putrescibles recueillies et disponibles pour valorisation via la digestion anaérobie ou autres, d'où les liens avec les taux : *Taux valorisation autre* et *Taux valorisation MP*.

Le troisième intrant, *Boues*, est assemblé à partir de trois sous-produits, soit : les boues d'usine de filtration des eaux, les boues industrielles et les boues de fosses septiques. La variable *Taux production boues* est fonction de la variable *Production de boues*. Les données sur la production des boues proviennent du PGMR de la MRC étudiée. La variable de niveau *Boues* affecte deux variables de taux soit : *Taux élimination Boues* et *Taux récupération Boues*. La première représente le pourcentage des boues éliminées, soit par enfouissement ou par incinération. Le *Taux récupération Boues* représente les boues qui se destinent à la valorisation. Celles-ci forment la variable de niveau *Boues à valoriser*. Ces boues peuvent emprunter deux fins en fonction des deux variables de taux suivantes : *Taux valorisation autre boues* et *Taux valorisation Boues*. La première représente d'autres types de valorisation autre que la digestion anaérobie choisie dans cette étude. Par exemple, la valorisation agricole de boues. Notons que le second taux représente la portion des boues qui est destinée à la digestion anaérobie.

Dans le but de fournir au modèle des niveaux d'intrants constants pour les volumes relatifs, le modèle a été suppléé d'un sous-secteur de calibrage des intrants. Composé de trois éléments, ce sous-secteur transmet au modèle les quantités utilisables selon les restrictions du mélange des trois intrants et de la capacité du digesteur. La constante *MR valo ratio* dicte le pourcentage relatif des intrants. La *capacité D* représente le volume maximal du digesteur. La *Capacité allocateur* joint les deux variables pour mesurer en volume les quantités utilisables versus disponibles de chacun des intrants.

#### 4.3.2 Le système de traitement

Les trois intrants déjections, matières putrescibles et boues à valoriser forment le *Total MR en traitement*. Ces matières forment la variable de niveau *Matières résiduelles*. De cette variable de niveau naissent deux extrants, soit les variables de taux : *Taux rejet Gaz* et *Taux rejet Digesta*.

#### 4.3.3 Les extrants

Le logiciel de simulation ne permet pas la sortie de flux supérieur au flux d'entrée. Par l'activité microbienne et le dégagement de gaz, les flux d'entrées et de sorties sont parfois supérieurs ou inférieurs à 1. Pour palier cette limitation logicielle, des facteurs de correction ont été ajoutés. Les calculs relatifs à ces facteurs de correction sont présentés en 5.4.2

Le *Taux rejet Digesta* vient former le *Taux ajustement digesta*. Celui-ci s'ajuste via le *Facteur ajustement Digesta* et un *Facteur perte clarification*. Le taux, ainsi modifié et ajusté, forme la variable de niveau *Digesta*. Le *Digesta* représente un des résidus de la digestion anaérobie. Il s'agit d'un liquide qui contient les matières sèches digérées. Le *Digesta* doit être transformé avant d'être valorisé ou bien d'être disposé.

La première étape consiste à la clarification. Cette étape permet de décanter le digesta et d'en retirer les effluents liquides. Le *Facteur clarification* agit sur les taux : *Taux effluents liquides C* et *Taux de concentration*. Le premier représente l'eau retirée via la décantation. Le second taux montre les boues restantes qui forment le *Digesta clarifié*. Les *effluents liquides C* représentent la portion liquide qui est retirée par la clarification. Ce liquide peut être traité et/ou disposé avec les eaux usées.

Suivant la clarification, le digesta nécessite une déshydratation mécanique. Deux variables de taux agissent sur la variable de niveau soit : *Taux effluents liquides D* et *Taux déshydratation*. Ces taux sont liés puisque le *facteur désydratation* agit en retirant les *Effluents liquides D* du *Digesta clarifié* en *Digesta condensé*. La déshydratation mécanique s'effectue par un presse-vis.

Les *effluents liquides D* représentent la portion liquide qui est retirée par la déshydratation mécanique. Ce liquide peut être traité et/ou largué avec les eaux usées.

Le *Digesta condensé* est influencé par deux variables de taux soit : *Taux de conversion Compost* qui forme la nouvelle variable de niveau *Compost* et la variable de taux *Taux disposition D*. Cette dernière représente la portion du *Digesta condensé* qui sera disposée.

Pour former le compost, il faut ajouter de la matière structurante au *Digesta condensé*. Dans le cas présent, la matière structurante est la tourbe. La variable *taux matières structurantes* ajoute la portion nécessaire au *digesta condensé* pour que la sillicité du compost atteigne un seuil défini. Ce taux dépend du niveau de *Digesta condensé* et du *Facteur matières structurantes*.

Le compost ainsi réalisé peut prendre deux avenues : la valorisation ou la disposition via l'enfouissement ou l'incinération. Le *taux valorisation compost* représente le compost valorisé soit par une utilisation municipale, agricole ou résidentielle. La *Valeur compost* est fonction du *Prix compost* et du *Taux valorisation compost*.

La filière du compost étant terminée, les paragraphes suivants présentent les trois autres extrants du système soit : biogaz, gaz naturel et électricité.

Le *Taux rejet Gaz*, représente le biogaz tel que capté dans le processus de digestion anaérobie. Ce gaz peut être utilisé ou vendu tel quel ou bien traité pour devenir un gaz purifié : le gaz naturel. Ce gaz peut également être utilisé ou vendu, ou bien servir à la production d'électricité.



Le *taux de rejet Gaz* s'ajuste avec le *Taux facteur ajustement Biogaz* via le *Facteur ajustement Biogaz*. Ces deux éléments affectent les trois sections qui traitent de gaz soit; la torchère, le biogaz et le méthane.

Le gaz produit par la digestion anaérobie est non compressible, ce qui le rend non stockable. En cas de bris d'équipement ou d'entretien, le gaz doit être brûlé. Afin de représenter cette situation possible le module torchère a été ajouté. Dans la simulation, ce module reste inopérant puisque l'ensemble du gaz dégagé est utilisé pour des fins de valorisation. Le *Taux perte Gaz* représente une perte liée au processus de non valorisation du gaz. Il est calculé en fonction du *Facteur utilisation torchère*.

Au niveau de la filière de méthane, le *Taux rejet Gaz* est lié au *Taux de traitement Gaz*. À l'aide du facteur *Taux traitement Gaz*, il est possible de dicter au modèle le traitement ou non du gaz. Lorsque le facteur de traitement est fermé, l'ensemble du *Taux rejet Gaz*, sera entièrement dirigé vers la filière Biogaz.

La filière Biogaz comprend un *Taux utilisation vente GNT* (gaz non traité). Ce facteur est lié à la *Valeur Biogaz*, laquelle est jointe à un facteur de conversion J GJ (joules en gigajoules) et du *Prix Biogaz*.

Advenant que le facteur *Taux traitement Gaz* est complètement ouvert. L'ensemble de la ressource *Taux rejet Gaz* se dirige vers la variable de niveau *Biogaz à traiter*. Ce biogaz est séparé en deux effluents grâce au *Facteur perte purification*. Le traitement du gaz permet de retirer les éléments corrosifs naturellement présents dans le gaz. Les éléments corrosifs retirés sont représentés par le *Taux perte purification*. La portion restante forme le *Taux Méthane*. Celle-ci forme la variable de niveau *Méthane GT* (gaz traité). Le traitement du gaz se fait par l'utilisation d'un bio filtre.

Le *Méthane GT* peut être utilisé ou vendu, ou bien servir de combustible dans la production d'électricité. Pour ce faire, le *Méthane GT* est lié au *Taux utilisation vente*, lequel est lié au *Facteur UV PkWh* (utilisation vente ou production d'électricité). Lorsque la vanne est ouverte, le gaz est utilisé ou vendu et il est possible d'évaluer la valeur de celui-ci avec la variable *Valeur Gaz*, qui est lié au *Taux de conversion J GJ* et au *Prix Gaz*.

Dans le cas où la vanne est fermée, le gaz sert à la production d'électricité. Le *Taux utilisation vente Gaz* forme le *Taux GT prod kWh*. Ce taux est affecté par le *Facteur UV PkWh* présenté ci-haut et du *Facteur m3 kWe*. La *Valeur kWh* se calcule en fonction du *Taux GT prod kWh* et du *Prix kWh*.

#### 4.4 Le modèle niveaux-taux

La création du modèle niveaux-taux (N-T) sert à la modélisation quantitative. Dans le cadre de la DS, cette étape fait référence à la portion quantitative de la recherche afin d'illustrer le comportement du modèle ou système. Les sections suivantes présentent des portions du modèle. Le modèle dans son ensemble est présenté en annexe 4, notamment à cause de sa grande taille. La section 4.4.1 montre les intrants, la section 4.4.2, la digestion et finalement la section 4.4.3 montre les extrants. La dernière section du modèle niveaux-taux, la section 4.4.4, montre les calculs économiques reliés au modèle. Chacune des sections de modèle N-T présente une représentation du modèle sous la forme d'une figure. Suivant cette première représentation, un tableau montre les équations qui forment le modèle.

Certains des facteurs ne sont pas présentés dans les tableaux puisque non pertinents à la compréhension des mécanismes du modèle. C'est le cas des constantes, des variables de niveau et des facteurs de décision. Les constantes, comme les facteurs de conversion et d'ajustement, sont présentées au chapitre 5. Le dictionnaire des variables, annexe 3, montre l'ensemble des variables composant le modèle à titre de référence. Une représentation globale du modèle se trouve en annexe 4.

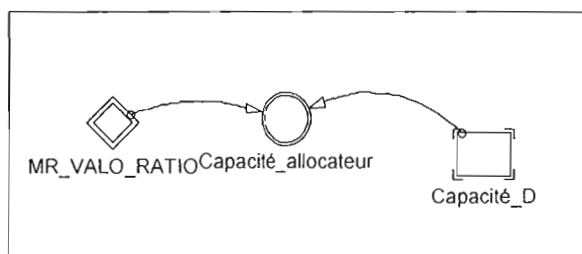
#### 4.4.1 Partie 1 : Les intrants

La partie 1 comprend quatre sections qui montrent les trois intrants du modèle; soit les déjections animales, les boues et les matières putrescibles ainsi qu'un mécanisme permettant de réguler l'utilisation de celles-ci dans un objectif de fournir au digesteur un mélange précis d'intrants. Ce dernier module, figure 30, se nomme calibrage des intrants.

##### 4.4.1.1 Le calibrage des intrants

Le calibrage des intrants est important dans le modèle puisque les ratios calculés sont fonction de l'homogénéité des trois intrants utilisés. Les sous-sections suivantes présentent chacun des mécanismes propres aux intrants. La figure 30 montre le mécanisme de calibrage alors que le tableau 16 présente les équations relatives au mécanisme.

**Figure 30 - Calibrage des intrants**



**Tableau 16 - Équations : Calibrage des intrants**

$MR\_VALO\_RATIO = VECTOR(.98,.01,.01)$
$Capacité\_allocateur = Capacité\_D * MR\_VALO\_RATIO$
$Capacité\_D = Capacité\_ajout\_par\_digeur$

La constante *MR VALO RATIO* a été ajoutée afin de contraindre le modèle à conserver l'équilibre établi, dans le mélange des intrants qui composent les matières résiduelles utilisées pour la digestion anaérobie. L'équation suivante définit un vecteur qui se lit ainsi : 96.5 % de

l'intrant 1 (déjections), 1.7 % du second intrant (boues) et de l'intrant numéro 3 (matières putrescibles). Pour s'imaginer ce concept, il suffit de le comparer à une recette.

$$MR\_VALO\_RATIO = VECTOR (.965,.017,.017)$$

La *Capacité allocateur* calcule le niveau d'intrant à utiliser dans le modèle pour conserver un équilibre dans les intrants : (0,965, 0,017, 0,017). Cet élément prescrit un mélange comprenant donc 98 % de déjections, 1 % de boues et 1 % de matières putrescibles. La recette ayant été établie par le *MR VALO RATIO*, il faut en mesurer les ingrédients. La formule suivante montre que la *Capacité allocateur* est égale à la *Capacité D* multipliée par le *MR valo ratio*. Il y a donc trois *Capacité allocateur* qui agissent chacune sur un seul intrant. Elles sont identifiées : *Capacité\_allocateur(1)*, *Capacité\_allocateur(2)* et *Capacité\_allocateur(3)* pour chacun des modules des intrants.

$$Capacité\_allocateur = Capacité\_D * MR\_valo\_ratio$$

La *Capacité D* représente la capacité ou le volume du digesteur dans le modèle. Dans le cas présent, la capacité initiale du modèle est de 3 500 m<sup>3</sup>. Étant donné que le modèle peut, en fonction des volumes à traiter, augmenter la capacité via l'ajout de digesteur supplémentaire, il est égal à la *Capacité ajout par digesteur*. Cette capacité provient d'un module d'ajustement de capacité pour le digesteur. Il est présenté en 5.3.2.1. La fonction suivante montre l'équation décrite.

$$Capacité\_D = Capacité\_ajout\_par\_digesteur$$

#### 4.4.1.2 Les déjections

Cette section présente le mécanisme de modélisation de l'intrant déjection dans le modèle. La figure 31 montre le mécanisme d'entrée des déjections dans le modèle alors que le tableau 17 présente les équations relatives au mécanisme.

Figure 31 - Intrant 1 : Déjections

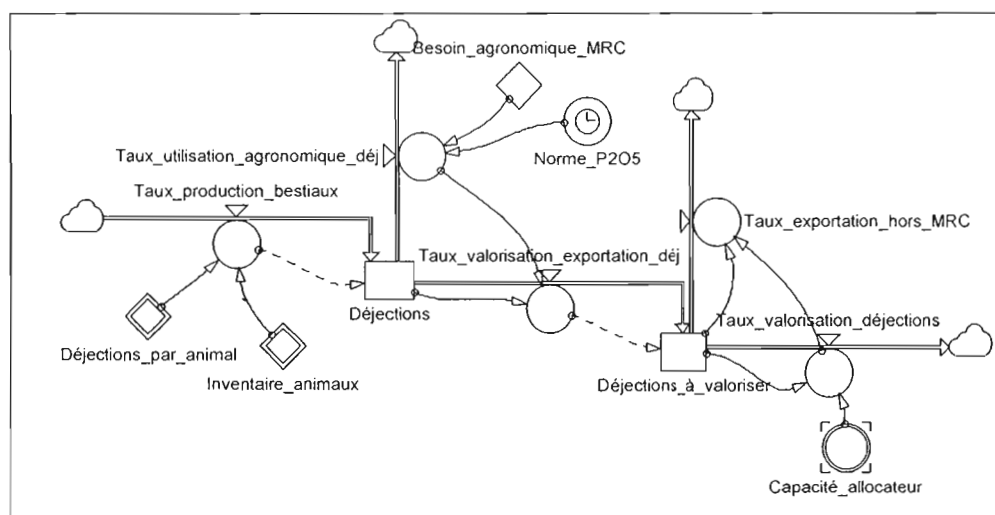


Tableau 17 - Équations déjections

$\text{Taux\_production\_bestiaux} =$ $\text{inventaire\_animaux}(1) * \text{Déjections\_par\_animal}(1) + \text{inventaire\_animaux}(2) * \text{Déjections\_par\_animal}(2) +$ $\text{inventaire\_animaux}(3) * \text{Déjections\_par\_animal}(3) + \text{inventaire\_animaux}(4) * \text{Déjections\_par\_animal}(4)$
$\text{Déjections} = \text{Taux\_production\_bestiaux}$
$\text{Taux\_utilisation\_agronomique\_déj} = \text{Besoin\_agronomique} * \text{Norme\_P2O5}$
$\text{Norme\_P2O5} = 2 - \text{STEP}(0.666, 204) - \text{STEP}(0.333, 408)$
$\text{Taux\_valorisation\_exportation\_déj} = \text{Déjections} - \text{Taux\_utilisation\_agronomique\_déj}$
$\text{Déjections\_à\_valoriser} = \text{Taux\_valorisation\_exportation\_déj}$
$\text{Taux\_exportation\_hors\_MRC} = \text{Déjections\_à\_valoriser} - \text{Taux\_valorisation\_déjections}$
$\text{Taux\_valorisation\_déjections} = \text{MIN}(\text{Déjections\_à\_valoriser}, \text{Capacité\_allocateur}(1))$
$\text{Capacité\_allocateur} = \text{Capacité\_D} * \text{MR\_VALO\_RATIO}$

Le *Taux production bestiaux* représente l'évaluation du niveau de déjections annuelles provenant de la combinaison des inventaires d'animaux ainsi que des moyennes de déjections selon les divers élevages. Dans le but de combiner les quatre types d'élevages, la variable de niveau *Production bestiaux* est composée d'une influence qui compile les données résultantes de l'inventaire de volailles multiplié par la moyenne des déjections de volailles et idem pour les productions porcine, bovine et ovine.

$$\begin{aligned} \text{Production\_bestiaux} = & \\ & \text{inventaire\_animaux}(1) * \text{Déjections\_par\_animal}(1) \\ & + \text{inventaire\_animaux}(2) * \text{Déjections\_par\_animal}(2) \\ & + \text{inventaire\_animaux}(3) * \text{Déjections\_par\_animal}(3) \\ & + \text{inventaire\_animaux}(4) * \text{Déjections\_par\_animal}(4) \end{aligned}$$

Issue de *Taux production bestiaux*, la variable *Déjections* est égale à celle-ci. L'équation suivante montre la fonction.

$$\text{Déjections} = \text{Taux\_production\_bestiaux}$$

Le *Taux utilisation agronomique déj* représente le volume des déjections qui peut être épandu à l'intérieur de la MRC. L'équation suivante montre le *Besoin agronomique* calculé et multiplié par le facteur d'ajustement qu'est la *Norme P2O5* dans l'équation.

$$\text{Taux\_utilisation\_agronomique\_déj} = \text{Besoin\_agronomique} * \text{Norme\_P2O5}$$

L'évaluation de la *Norme P2O5* dans le modèle nécessite l'utilisation de la fonction STEP afin de refléter le caractère évolutif de la norme. Cette fonction permet d'ajouter une fonction de temps. La fonction STEP (x,t), déjà liée au *besoin agronomique*, se lit ainsi : au temps zéro on considère que le facteur *besoin agronomique* est multiplié par un facteur 2. Ensuite, à la période (t.), la fonction retire x fois le facteur *besoin agronomique*. Au départ, on a 2 fois

le *besoin agronomique*, ensuite on décide de retirer 0.666 fois le volume de *besoin agronomique* à partir de la période 204. De même, on retire 0.333 fois le volume du facteur à partir de la période 408. Ainsi, la fonction STEP, telle qu'utilisée dans cette équation, agit ainsi sur le facteur *besoin agronomique* : du  $t < 203$ , le facteur est multiplié par 2, de  $t \geq 204$  à  $t < 408$  le facteur est réduit de 0.666 et de  $t \geq 408$  le facteur est à nouveau réduit de 0.333.

$$\text{Norme\_P2O5} = 2 - \text{STEP}(0.666, 204) - \text{STEP}(0.333, 408)$$

Le *Taux valorisation exportation déj* représente la portion des déjections qui ne peuvent être épandues à l'intérieur de la MRC. Ce taux provient de la différence entre les *Déjections* et le *Taux utilisation agronomique déj*. La fonction suivante montre celle-ci.

$$\text{Taux\_valorisation\_exportation\_déj} = \text{Déjection} - \text{Taux\_utilisation\_agronomique\_déj}$$

Issu de *Déjections à valoriser*, le *taux valorisation exportation déj* est égal à celui-ci. L'équation suivante montre la fonction.

$$\text{Déjections\_à\_valoriser} = \text{Taux\_valorisation\_exportation\_déj}$$

Le *Taux exportation hors MRC* représente une portion des déjections à valoriser. Cette portion représente les déjections qui doivent être exportées dans d'autres MRC. Ce taux provient de la différence entre les *Déjections à valoriser* et le *Taux valorisation déjections*; soit la seconde portion des déjections à valoriser. L'équation suivante montre cette démarche mathématique.

$$\begin{aligned} \text{Taux\_exportation\_hors\_MRC} = \\ \text{Déjections\_à\_valoriser} - \text{Taux\_valorisation\_déjections} \end{aligned}$$

Le *Taux valorisation déjections* représente la portion des déjections qui seront valorisées par la digestion anaérobie dans le modèle. Cette fonction comprend une fonction minimum (MIN). Cette fonction est nécessaire puisque le modèle est basé sur un mélange déterminé des trois intrants. La fonction minimum contraint la fonction à choisir le niveau inférieur entre les *Déjections à valoriser* réelles et les niveaux de déjections nécessaires au mélange via la *Capacité allocateur* (1), c'est-à-dire les déjections utilisables.

$$\text{Taux\_valorisation\_déjections} = \text{MIN}(\text{Déjections\_à\_valoriser}, \text{Capacité\_allocateur}(1))$$

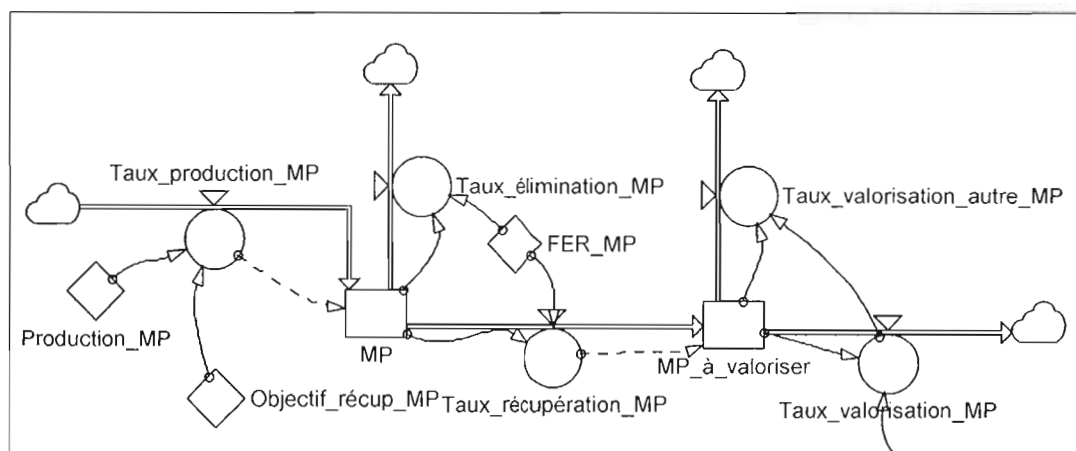
Tel que présenté ci-haut, la *Capacité allocateur* calcule le niveau d'intrants à utiliser. Le modèle a conservé un équilibre dans les intrants : (0,965, 0,017, 0,017). Cet élément prescrit un mélange comprenant donc 96.5 % de déjections, 1.7 % de boues et 1.7 % de matières putrescibles. La formule suivante montre que la *Capacité allocateur* est égale à la *Capacité D* multipliée par le *MR VALO RATIO*.

$$\text{Capacité\_allocateur} = \text{Capacité\_D} * \text{MR\_VALO\_RATIO}$$

#### 4.4.1.3 Les matières putrescibles

Cette section présente le mécanisme de modélisation de l'intrant matières putrescibles dans le modèle. La figure 32 montre le mécanisme d'entrée des matières putrescibles dans le modèle alors que le tableau 18 présente les équations relatives au mécanisme.



**Figure 32 - Intrant 2 : Matières putrescibles****Tableau 18 - Équations : Matières putrescibles**

$Taux\_production\_MP = Production\_MP * Objectif\_récup\_MP$
$MP = Taux\_production\_MP$
$Taux\_élimination\_MP = MP * (1 - FER\_MP)$
$Taux\_récupération\_MP = MP * (FER\_MP)$
$MP\_à\_valoriser = Taux\_récupération\_MP$
$Taux\_valorisation\_autre\_MP = MP\_à\_valoriser - Taux\_valorisation\_MP$
$Taux\_valorisation\_MP = MIN(MP\_à\_valoriser, Capacité\_allocateur(2))$
$Capacité\_allocateur = Capacité\_D * MR\_VALO\_RATIO$

Le Taux de production MP représente les matières putrescibles produites par les citoyens de la MRC. La récupération de ces matières nécessite la collaboration citoyenne. Comme pour la récupération des matières recyclables, il est actuellement impensable de croire qu'il est possible de récupérer l'ensemble de celles-ci. L'objectif de récupération, selon la Politique

98-08, est de récupérer 65 % des matières putrescibles. Afin de représenter cet objectif de récupération le *Taux production MP* est lié à une fonction MAX qui permet au modèle de simuler le système entre le *niveau récupération* et *l'objectif de récupération*.

$$\text{Taux\_production\_MP} = \text{Production\_MP} * \text{Objectif\_recup\_MP}$$

Issue de Taux production MP, la variable de niveau MP est égale à celui-ci. L'équation suivante montre la fonction.

$$\text{MP} = \text{Taux\_production\_MP}$$

Le *Taux élimination MP* représente le taux de matières putrescibles éliminées. La fonction suivante montre la variable de niveau *MP* multipliée par la différence entre 1 et le Facteur Élimination Récupération MP (*FER MP*).

$$\text{Taux\_élimination\_MP} = \text{MP} * (1 - \text{FER\_MP})$$

Le *Taux valorisation autre MP* représente le taux de matière putrescible qui sera valorisé autrement que par la digestion anaérobie. La fonction suivante montre la variable de niveau *MP* à valoriser moins le *Taux valorisation MP*. Le résultat représente le *Taux de valorisation autre MP*.

$$\text{Taux\_valorisation\_autre\_MP} = \text{MP\_à\_valoriser} - \text{Taux\_valorisation\_MP}$$

Le *Taux récupération MP* représente la portion des matières putrescibles récupérées pour la valorisation. L'équation suivante montre la variable de niveau *MP* multipliée par le Facteur Élimination Récupération MP (*FER MP*).

$$\text{Taux\_récupération\_MP} = \text{MP} * (\text{FER\_MP})$$

Issue de *Taux récupération MP*, la variable de niveau *MP* est égale à celui-ci. L'équation suivante montre la fonction.

$$MP\_à\_valoriser = Taux\_récupération\_MP$$

Le *Taux de valorisation MP* représente le taux de matières putrescibles valorisé via la digestion anaérobie. La fonction suivante comprend une fonction minimum qui limite la quantité à valoriser au niveau déterminé par la variable *Capacité allocateur(2)*.

$$Taux\_valorisation\_MP = MIN(MP\_à\_valoriser, Capacité\_allocateur(2))$$

La *Capacité allocateur* calcule le niveau d'intrants à utiliser dans le modèle afin de conserver un équilibre dans les intrants : (0,965, 0,017, 0,017). Cet élément prescrit un mélange comprenant donc 96.5 % de déjections, 1.7 % de boues et 1.7 % de matières putrescibles. La formule suivante montre que la *Capacité allocateur* est égale à la *Capacité D* multipliée par le *MR VALO RATIO*.

$$Capacité\_allocateur = Capacité\_D * MR\_VALO\_RATIO$$

#### 4.4.1.4 Les boues

Cette section présente le mécanisme de modélisation de l'intrant boues dans le modèle. La figure 33 montre le mécanisme d'entrée des boues dans le modèle alors que le tableau 19 présente les équations relatives au mécanisme.

Figure 33 - Intrant 3 : Boues

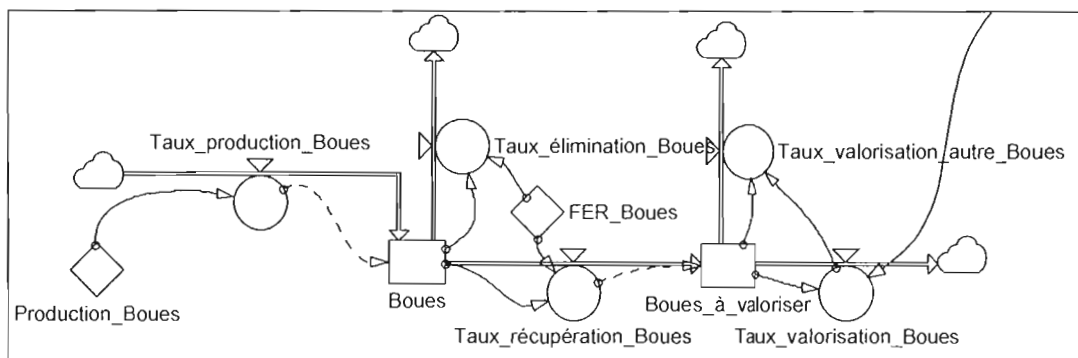


Tableau 19 - Boues : équations

$Taux\_production\_boues = Production\_boues$
$Boues = Taux\_production\_boues$
$Taux\_élimination\_Boues = Boues * (1 - FER\_boues)$
$Taux\_récupération\_boues = Boues * FER\_boues$
$Boues\_à\_valoriser = Taux\_récupération\_boues$
$Taux\_valorisation\_autre\_Boues = Boues\_à\_valoriser - Taux\_valorisation\_boues$
$Taux\_valorisation\_boues = MIN(Boues\_à\_valoriser, Capacité\_allocateur(3))$
$Capacité\_allocateur = Capacité\_D * MR\_VALO\_RATIO$

*Taux production boues* représente la production des boues. L'équation suivante montre que le *Taux production boues* est égal à la *Production boues*. Dans le cas présent, l'ensemble des boues sont récupérées et il n'est pas nécessaire d'ajouter un objectif de récupération puisqu'il serait de 100 %.

$$Taux\_production\_boues = Production\_boues$$

Issue de *Taux production boues*, la variable de niveau *Boues* est égale à celui-ci. L'équation suivante montre la fonction.

$$\text{Boues} = \text{Taux\_production\_boues}$$

Le *Taux élimination Boues* représente le taux de boues éliminées. La fonction suivante montre la variable de niveau *boues* multipliée par la différence entre 1 et le Facteur Élimination Récupération Boues (*FER Boues*).

$$\text{Taux\_élimination\_Boues} = \text{Boues} * (1 - \text{FER\_boues})$$

Le *Taux récupération boues* représente la portion des boues récupérées pour la valorisation. L'équation suivante montre la variable de niveau *Boues* être multipliée par le Facteur Élimination Récupération Boue (*FER Boues*).

$$\text{Taux\_récupération\_boues} = \text{Boues} * \text{FER\_boues}$$

Issue de *Taux récupération boues*, la variable de niveau *Boues à valoriser* est égale à celui-ci. L'équation suivante montre la fonction.

$$\text{Boues\_à\_valoriser} = \text{Taux\_récupération\_boues}$$

Le *Taux valorisation autre Boues* représente le taux de Boues valorisé autrement que par la digestion anaérobie. La fonction suivante montre la variable de niveau *Boues à valoriser* moins le *Taux valorisation Boues*.

$$\text{Taux\_valorisation\_autre\_Boues} = \text{Boues\_à\_valoriser} - \text{Taux\_valorisation\_boues}$$

Le *Taux de valorisation Boues* représente le taux de boues valorisé via la digestion anaérobie. La fonction suivante comprend une fonction minimum qui permet de respecter le niveau d'intrants nécessaires à l'équilibre du mélange dans le modèle. La fonction MIN force le modèle à sélectionner le niveau boues maximal qui peut être utilisé selon de la *Capacité allocateur (3)*.

$$\text{Taux\_valorisation\_boues} = \text{MIN}(\text{Boues\_à\_valoriser}, \text{Capacité\_allocateur}(3))$$

La *Capacité allocateur* calcule le niveau d'intrants à utiliser dans le modèle pour conserver un équilibre dans les intrants : (0,965, 0,017, 0,017). Cet élément prescrit un mélange comprenant donc 96.5 % de déjections, 1.7 % de boues et 1.7 % de matières putrescibles. La formule suivante montre que la *Capacité allocateur* est égale à la *Capacité D* multipliée par le *MR VALO RATIO*.

$$\text{Capacité\_allocateur} = \text{Capacité\_D} * \text{MR\_VALO\_RATIO}$$

#### 4.4.2 Partie 2 : La digestion

La présente section présente deux sous-sections. La section 4.4.2.1 montre le mécanisme de régulation de la capacité du digesteur. La seconde sous-section montre le processus de digestion en 4.4.2.2.

##### 4.4.2.1 La capacité du digesteur

Cette section présente le mécanisme de contrôle de la capacité du digesteur en fonction des scénarios proposés dans le modèle. La figure 34 montre le mécanisme d'ajustement de la capacité du digesteur dans le modèle alors que le tableau 20 présente les équations relatives au mécanisme.

Figure 34 - Capacité digesteur

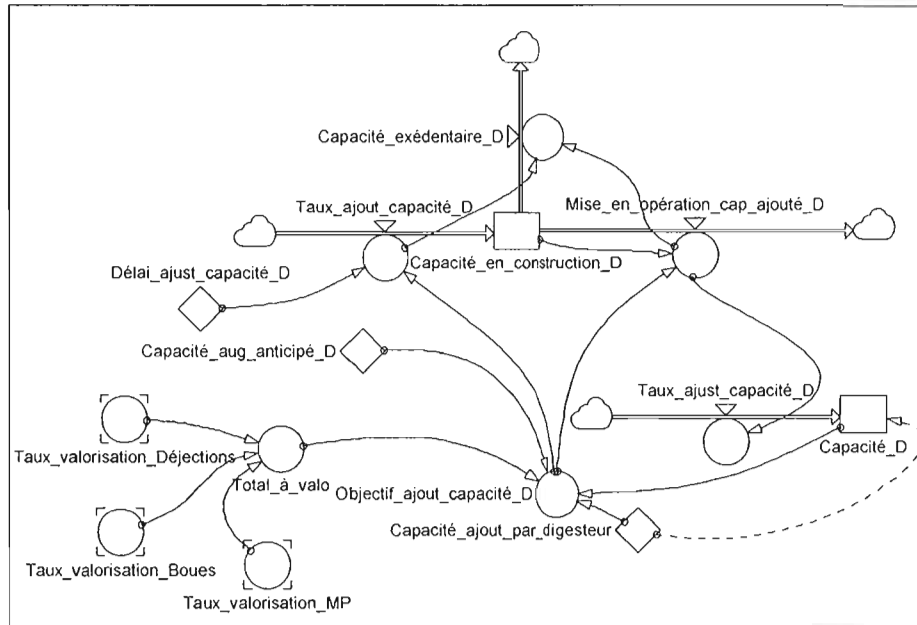


Tableau 20 - Équations : Capacité digesteur

Taux_valorisation_exportation_déj =
Déjection_annuelles-Taux_utilisation_agronomique_des_déjections
Taux_valorisation_boues = MIN(Boues_à_valoriser,Capacité_allocateur(3))
Taux_récupération_MP = MP*(FEV_MP)
Total_à_valo =
Taux_valorisation_déjections+Taux_valorisation_Boues+Taux_valorisation_MP
Objectif_ajout_capacité_D =
IF(Total_à_valo>=Capacité_aug_anticipé_D*Capacité_D,
Capacité_ajout_par_digesteur OTHERWISE, 0)
Tx_ajout_capacité_D = Objectif_ajout_capacité_D/Délai_ajust_capacité_D
Capacité_exédentaire_D =
IF(Mise_en_opération_cap_ajouté_D>0, Tx_ajout_capacité_D OTHERWISE,0)
Mise_en_opération_cap_ajouté_D =
IF(Capacité_en_construction_D>=Objectif_ajout_capacité_D,
MAX(Capacité_en_construction_D,0) OTHERWISE, 0)
Taux_ajust_capacité_D = Mise_en_opération_cap_ajouté_D
Capacité_D = Capacité_ajout_par_digesteur

Le *Taux valorisation déjections* représente la portion des déjections qui seront valorisées par la digestion anaérobie dans le modèle.

$$\text{Taux\_valorisation\_déjections} = \text{MIN}(\text{Déjections\_à\_valoriser}, \text{Capacité\_allocateur}(1))$$

Le *Taux de valorisation Boues* représente le taux de boues qui sera valorisé via la digestion anaérobie.

$$\text{Taux\_valorisation\_boues} = \text{MIN}(\text{Boues\_à\_valoriser}, \text{Capacité\_allocateur}(3))$$

Le *Taux de valorisation MP* représente le taux de matières putrescibles qui sera valorisé via la digestion anaérobie.

$$\text{Taux\_valorisation\_MP} = \text{MIN}(\text{MP\_à\_valoriser}, \text{Capacité\_allocateur}(2))$$

Le *Total à valo* représente la somme des trois intrants : *Taux valorisation déj*, *Taux valorisation boues* et *Taux valorisation MP*.

$$\begin{aligned} \text{Total\_à\_valo} = \\ \text{Taux\_valorisation\_déjections} + \text{Taux\_valorisation\_Boues} + \text{Taux\_valorisation\_MP} \end{aligned}$$

L'*Objectif ajout capacité D* offre au système une capacité d'auto ajustement de la capacité du digesteur. La formule suivante possède une fonction  $\text{IF}(X \geq Y, Z, \text{OTHERWISE}, 0)$  qui se lit ainsi : Si X est plus grand ou égal qu'Y alors Z, si non zéro. La fonction montre que si le *Total à valo* est  $\geq$  *Capacité aug anticipé D* multiplier par *Capacité D* alors utilise la *Capacité ajout par digesteur*, sinon prend 0.



$$\text{Objectif\_ajout\_capacité\_D} = \text{IF}(\text{Total\_à\_valo} \geq \text{Capacité\_aug\_anticipé\_D} * \text{Capacité\_D}, \text{Capacité\_ajout\_par\_digesteur} \text{ OTHERWISE, } 0)$$

Le *Tx ajout capacité D* représente la capacité augmentée suivant l'*Objectif ajout de capacité* divisé par le *Délais ajout capacité D*. La fonction suivante montre ce calcul.

$$\text{Tx\_ajout\_capacité\_D} = \text{Objectif\_ajout\_capacité\_D} / \text{Délai\_ajust\_capacité\_D}$$

La Capacité excédentaire D représente la fonction du module qui ajuste la capacité du digesteur et qui retire la capacité en construction, lorsque la capacité du digesteur est atteinte, suite à la construction.

$$\text{Capacité\_exédentaire\_D} = \text{IF}(\text{Mise\_en\_opération\_cap\_ajouté\_D} > 0, \text{Tx\_ajout\_capacité\_D} \text{ OTHERWISE, } 0)$$

*Mise en opération cap ajouté D* représente la fonctionnalité qui permet d'ajouter réellement la capacité. La formule contient une fonction IF puis un MAX. La fonction MAX (X,Y) se lit ainsi : la fonction choisit de X ou de Y le nombre le plus grand. Dans le cas de cette fonction particulière, la fonction MAX a pour objectif d'empêcher le modèle d'utiliser des nombres négatifs. La fonction suivante montre que la *Mise en opération cap ajouté D* sera égale au MAX entre la *Capacité en construction* et zéro, si la *Capacité en construction D* est  $\geq$  que l'*Objectif ajout capacité D*, sinon elle sera de zéro.

$$\begin{aligned} \text{Mise\_en\_opération\_cap\_ajouté\_D} = \\ \text{IF}(\text{Capacité\_en\_construction\_D} \geq \text{Objectif\_ajout\_capacité\_D}, \\ \text{MAX}(\text{Capacité\_en\_construction\_D}, 0) \text{ OTHERWISE, } 0) \end{aligned}$$

Le *Taux ajust capacité D* représente l'effet de la Mise en opération cap ajouté D au niveau de la Capacité D. La fonction montre que le *Taux ajust capacité D* est égal à la *Mise en opération cap ajouté D*.

$$\text{Taux\_ajust\_capacit _D} = \text{Mise\_en\_op ration\_cap\_ajout _D}$$

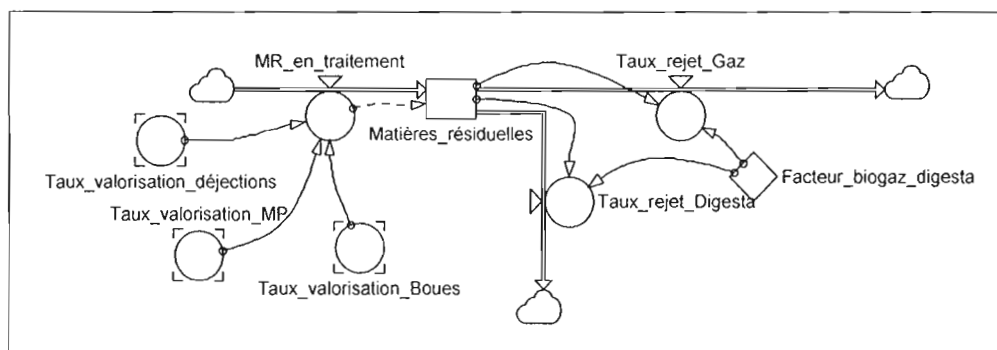
La *Capacité D* représente la capacité cumulée des digesteurs. L'équation suivante montre que la *Capacité D* est égale à la *Capacité ajout par digesteur*.

$$\text{Capacit _D} = \text{Capacit \_ajout\_par\_digeur}$$

#### 4.4.2.2 La digestion

Cette section présente le mécanisme de digestion dans le modèle. La figure 35 montre le mécanisme relatif à la première étape du processus de digestion dans le modèle alors que le tableau 21 présente les équations relatives au mécanisme.   cette première étape, les intrants sont transformés en digesta et gaz.

**Figure 35 - Modèle : Digestion**



**Tableau 21 - Équations : Digestion**

Taux_valorisation_exportation_déj = Déjection annuelles-Taux_utilisation_agronomique_des_déjections
Taux_récupération_MP = MP*(FEV_MP)
Taux_valorisation_boues = MIN(Boues_à_valoriser,Capacité_allocateur(3))
MR_en_traitement = Taux_valorisation_MP+Taux_valorisation_boues+Taux_valorisation_déjections
Matières_résiduelles = MR_en_traitement
Taux_de_rejet_de_Gaz = Matières_résiduelles*(Facteur_biogaz_digesta)*Facteur_ajustement_Biogaz
Taux_de_rejet_Digesta = Matières_résiduelles*(1-Facteur_biogaz_digesta)*Facteur_ajustement_Digesta

Pour les taux : *Taux valorisation déjections*, *Taux de valorisation Boues* et *Taux de valorisation M,P* voir respectivement les sections 4.4.1.2 à 4.4.1.4.

Les *MR en traitement* représentent le cumulatif des trois intrants présents dans ce modèle. Ainsi, la fonction montre le cumul des taux : de valorisation MP, de valorisation boues et de valorisation déjections.

$$\text{MR\_en\_traitement} = \text{Taux\_valorisation\_MP} + \text{Taux\_valorisation\_boues} + \text{Taux\_valorisation\_déjections}$$

Les *Matières résiduelles* représentent la variable de niveau correspondant aux *MR en traitement*. La fonction suivante montre cette égalité.

$$\text{Matières\_résiduelles} = \text{MR\_en\_traitement}$$

Le *Taux rejet Gaz* représente l'un des deux extrants post digestion anaérobie : le gaz. La fonction suivante montre l'origine du *Taux rejet Gaz*. Il s'agit de multiplier les *Matières résiduelles* par le *Facteur biogaz digesta* et le *Facteur ajustement biogaz*.

$$\text{Taux\_rejet\_Gaz} = \text{Matières\_résiduelles} * \text{Facteur\_biogaz\_digesta} * \text{Facteur\_ajustement\_Biogaz}$$

Le *Taux rejet Digesta* représente le deuxième extrant post digestion anaérobie : le digesta. La fonction suivante montre l'origine du *Taux rejet Digesta*. Il s'agit de multiplier les *Matières résiduelles* par la différence de 1 moins le *Facteur biogaz digesta* et ensuite du *Facteur ajustement Digesta*.

$$\text{Taux\_rejet\_Digesta} = \text{Matirères\_résiduelles} * (1 - \text{Facteur\_biogaz\_digesta}) * \text{Facteur\_ajustement\_Digesta}$$

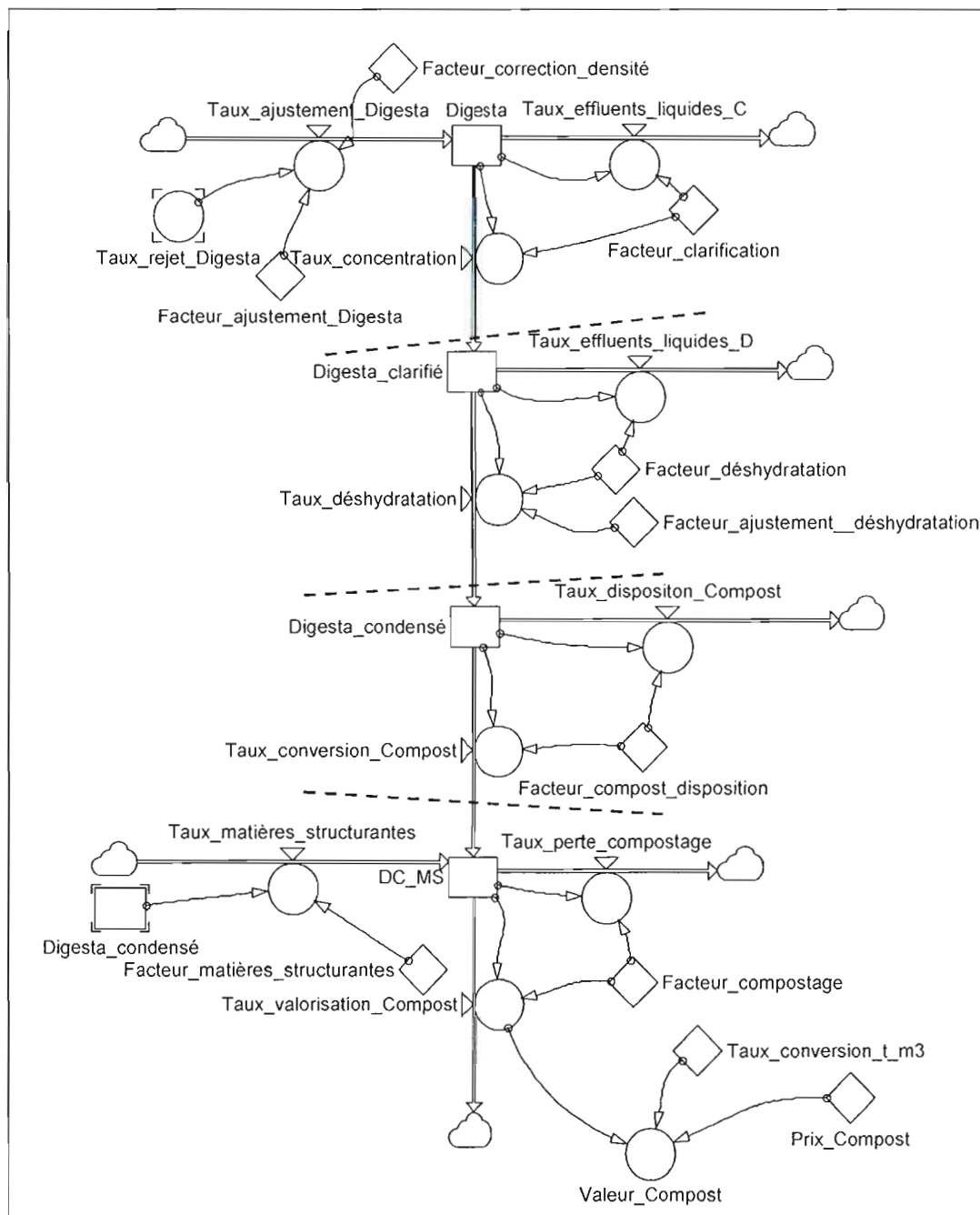
#### 4.4.3 Partie 3 : Les extrants

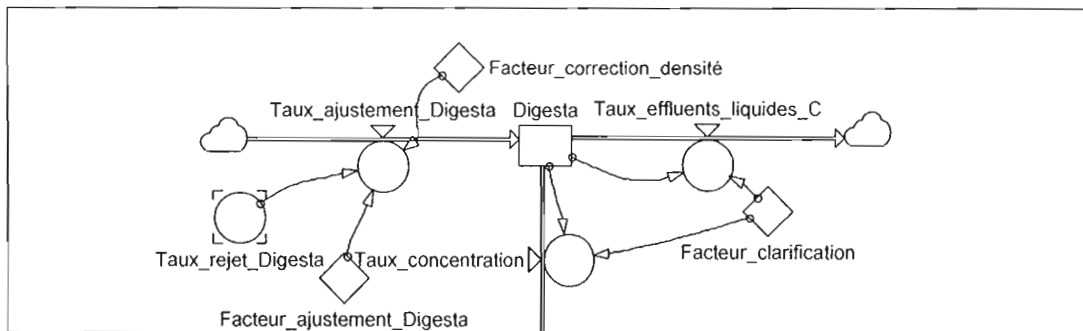
La présente section se divise en cinq sous-sections. La section 4.4.3.1 présente la filière du compostage. La section 4.4.3.2 montre la filière de la torchère. Les sections 4.4.3.3 à 4.4.3.5 montrent respectivement les extrants : gaz purifié, biogaz et électricité.

##### 4.4.3.1 Le compostage

La figure 36 montre le processus de compostage. Cette filiale représente une série d'étapes. Dans le but d'alléger la présentation, le processus de compostage est présenté en quatre sous-sections : clarification, déshydratation mécanique, disposition et compostage. Chacune de ces sous-sections est respectivement présentée aux figures 37, 38, 39 et 40.

Figure 36 - Modèle : Processus de compostage



**Figure 37 - Clarification****Tableau 22 - Équations : Clarification**

$Taux\_rejet\_Digesta = Matières\_résiduelles * (1 - Facteur\_biogaz\_digesta) * Facteur\_ajustement\_Digesta$
$Taux\_ajustement\_Digesta =$ $Facteur\_ajustement\_Digesta * Taux\_rejet\_Digesta * (1 - Facteur\_correction\_densité)$
$Taux\_effluents\_liquides\_C = Digesta * Facteur\_clarification$
$Taux\_concentration = Digesta * (1 - Facteur\_clarification)$

Le *Taux rejet Digesta* représente le deuxième extrant post digestion anaérobie : le digesta..

$$Taux\_rejet\_Digesta =$$

$$Matières\_résiduelles * (1 - Facteur\_biogaz\_digesta) * (1 - Facteur\_ajustement\_Digesta)$$

Issu de *Taux rejet Digesta*, le *Taux ajustement Digesta* représente le volume de digesta ajusté via le *Facteur ajustement Digesta* et le *Facteur perte clarification*.

$$Taux\_ajustement\_Digesta =$$

$$Facteur\_ajustement\_Digesta * Taux\_rejet\_Digesta * Facteur\_correction\_densité$$

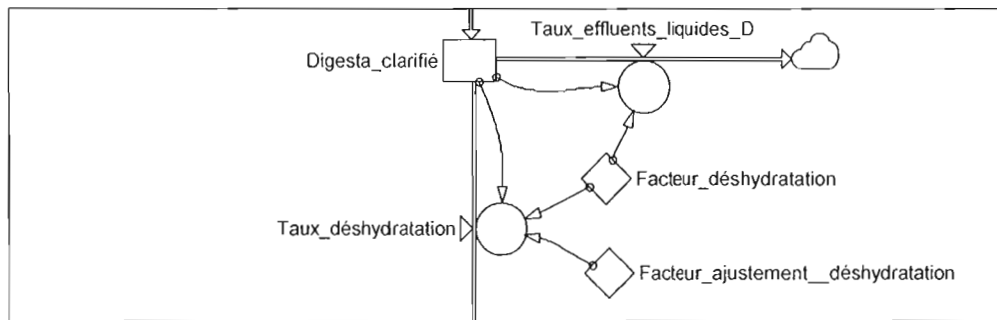
Le *Taux effluents liquides C* représente la portion liquide qui est retirée par la clarification. Ce taux est influencé par le *Facteur clarification*.

$$\text{Taux\_effluents\_liquides\_C} = \text{Digesta} * \text{Facteur\_clarification}$$

Le *Taux concentration* représente la portion du digesta qui est clarifié. Ce facteur est influencé par le *Facteur clarification*.

$$\text{Taux\_concentration} = \text{Digesta} * (1 - \text{Facteur\_clarification})$$

**Figure 38 - Déshydratation mécanique**



**Tableau 23 - Équations : Déshydratation mécanique**

$\text{Taux\_effluents\_liquides\_D} = \text{Digesta\_clarifié} * \text{Facteur\_déshydratation}$
$\text{Taux\_déshydratation} = \text{Digesta\_clarifié} * (1 - \text{Facteur\_déshydratation}) * \text{Facteur\_ajustement\_déshydratation}$

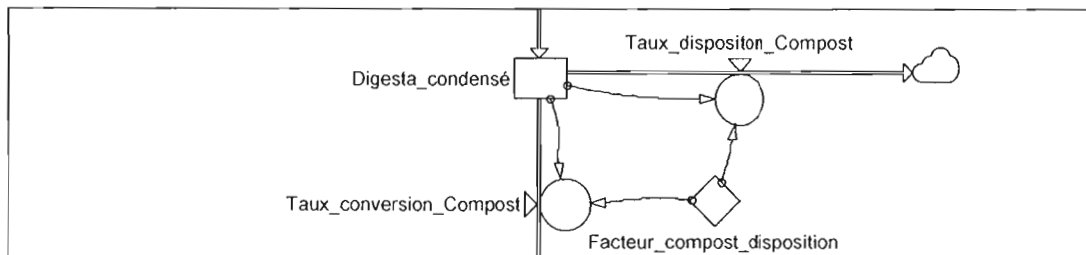
Le *Taux effluents liquides D* représente la portion liquide du *digesta clarifié* retiré par la déshydratation mécanique. La formule suivante montre que le *Taux effluents liquides D* est égal au *Digesta* multiplié par le *Facteur déshydratation*.

$$\text{Taux\_effluents\_liquides\_D} = \text{Digesta\_clarifié} * \text{Facteur\_déshydratation}$$

Le *Taux déshydratation* représente la partie solide du *Digesta clarifié* qui forme le *Digesta condensé* par le retrait de liquide de la déshydratation mécanique.

$$\begin{aligned} \text{Taux\_déshydratation} = \\ \text{Digesta\_clarifié} * (1 - \text{Facteur\_déshydratation}) * \text{Facteur\_ajustement\_déshydratation} \end{aligned}$$

**Figure 39 - Disposition compost**



**Tableau 24 - Équations : Disposition compost**

$\text{Taux\_conversion\_Compost} = \text{Digesta\_condensé} * \text{Facteur\_compost\_disposition}$
$\text{Taux\_dispositon\_Compost} = \text{Digesta\_condensé} * (1 - \text{Facteur\_compost\_disposition})$

Le *Taux conversion Compost* représente la portion du *Digesta condensé* qui se destine à la valorisation via le compostage. La fonction suivante montre que le *Digesta condensé* est multiplié par le *Facteur compost incinération* et forme le *Taux conversion Compost*.

$$\begin{aligned} \text{Taux\_conversion\_Compost} = \\ \text{Digesta\_condensé} * \text{Facteur\_compost\_incinération} \end{aligned}$$

Le *Taux disposition Compost* représente la portion du *Digesta condensé* qui est destiné à la disposition soit par enfouissement ou par incinération.

$$\text{Taux\_dispositon\_Compost} = \text{Digesta\_condensé} * (1 - \text{Facteur\_compost\_disposition})$$



Figure 40 - Compostage

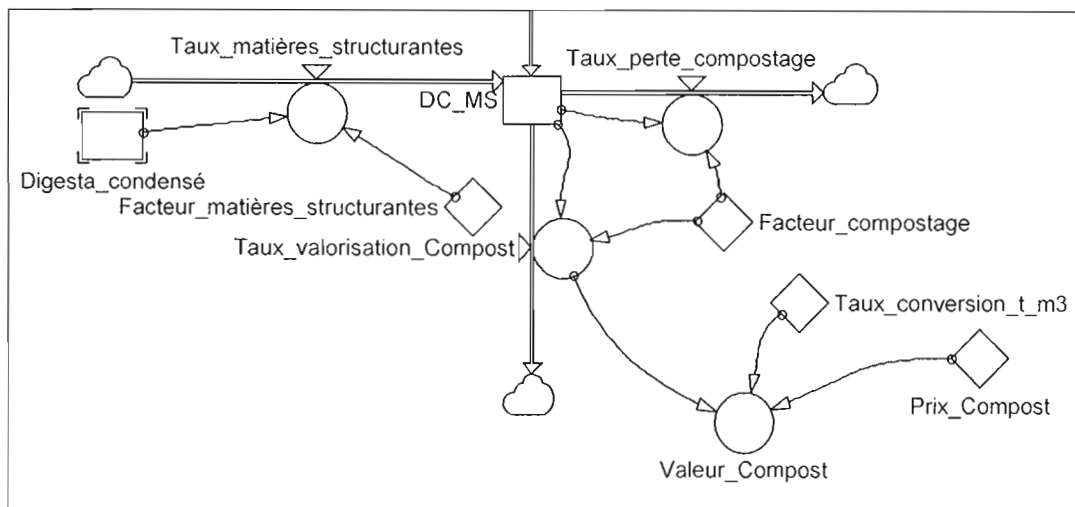


Tableau 25 - Équations : Compostage

$\text{Taux\_matières\_structurantes} = \text{Digesta\_condensé} * \text{Facteur\_matières\_structurantes}$
$\text{Taux\_perte\_compostage} = \text{DC\_MS} * (1 - \text{Facteur\_compostage})$
$\text{Taux\_valorisation\_compost} = \text{DC\_MS} * \text{Facteur\_compostage}$
$\text{Valeur\_compost} = \text{Taux\_valorisation\_Compost} * \text{Prix\_compost}$

Le *Taux matières structurantes* représente l'ajout de matières sèches qui permettent de compléter le compostage du *digesta condensé*. Le *Taux matières structurantes* est ainsi influencé par un *facteur matières structurantes* multiplié par le volume de *Digesta condensé*.

$$\text{Taux\_matières\_structurantes} = \text{Digesta\_condensé} * \text{Facteur\_matières\_structurantes}$$

Le *Taux perte compostage* représente la portion de matières qui est perdue par le compostage.

$$\text{Taux\_perte\_compostage} = \text{DC MS} * (1 - \text{Facteur\_compostage})$$

Le Taux valorisation compost représente le taux de compost destiné à la valorisation.

$$\text{Taux\_valorisation\_compost} = \text{DC MS} * \text{Facteur\_compostage}$$

La *Valeur Compost* représente la valeur monétaire provenant de la vente du compost produit. La fonction suivante montre que la *Valeur compost* dépend du *Taux de valorisation* multiplié par le *Prix compost*.

$$\text{Valeur\_compost} = \text{Taux\_valorisation\_Compost} * \text{Prix\_compost}$$

#### 4.4.3.2 La torchère

La figure 41 montre l'ensemble de la filière gaz. Dans l'objectif de simplifier la compréhension du lecteur, le modèle est présenté en trois sections visibles sur la figure 35 par les traits de division pointillés. La torchère est illustrée en figure 42. L'équation de ce mécanisme est présentée au tableau 23.

Figure 41 - Extrants

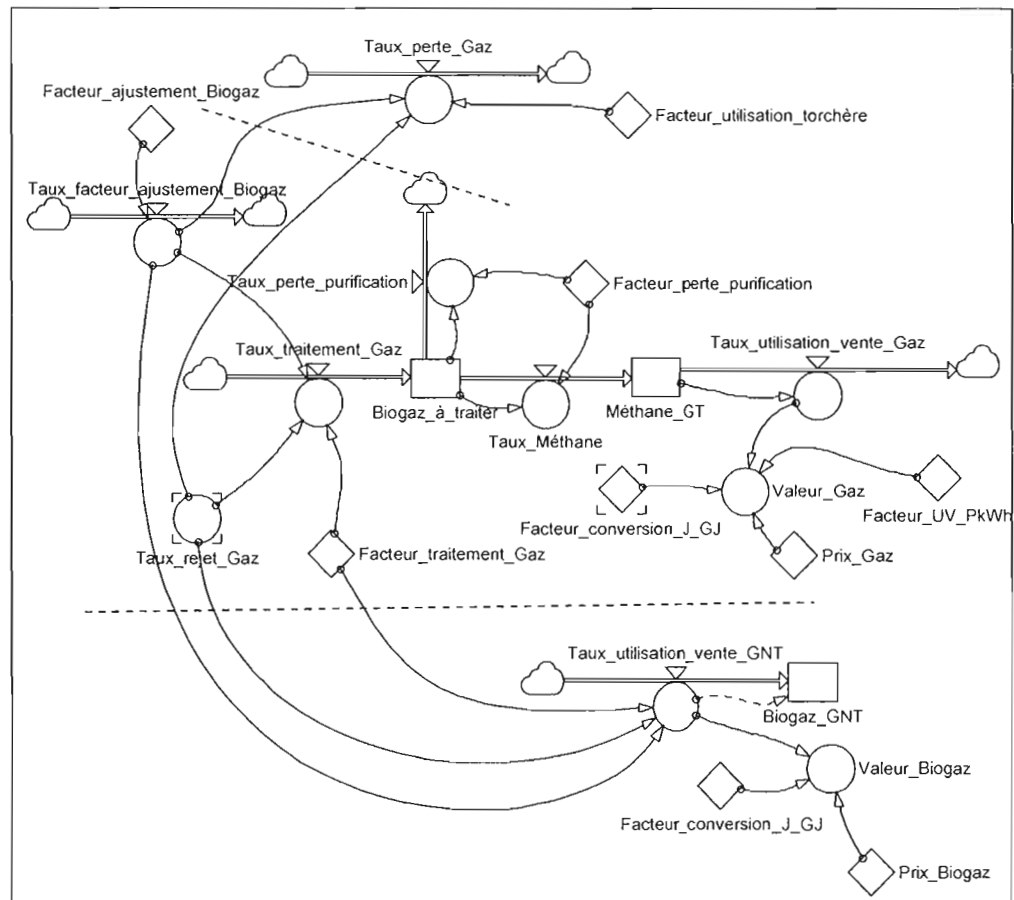


Figure 42 - Torchère

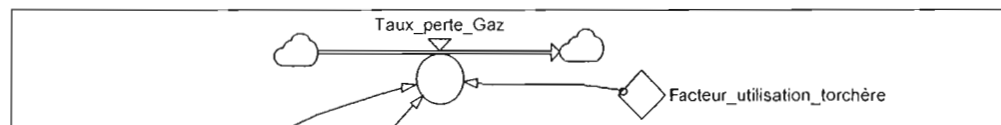


Tableau 23 – Torchère : Équations et VI

$\text{Taux\_de\_perte} = \text{Taux\_de\_rejet\_de\_Gaz} * \text{Facteur\_utilisation\_torchère}$
----------------------------------------------------------------------------------------------------

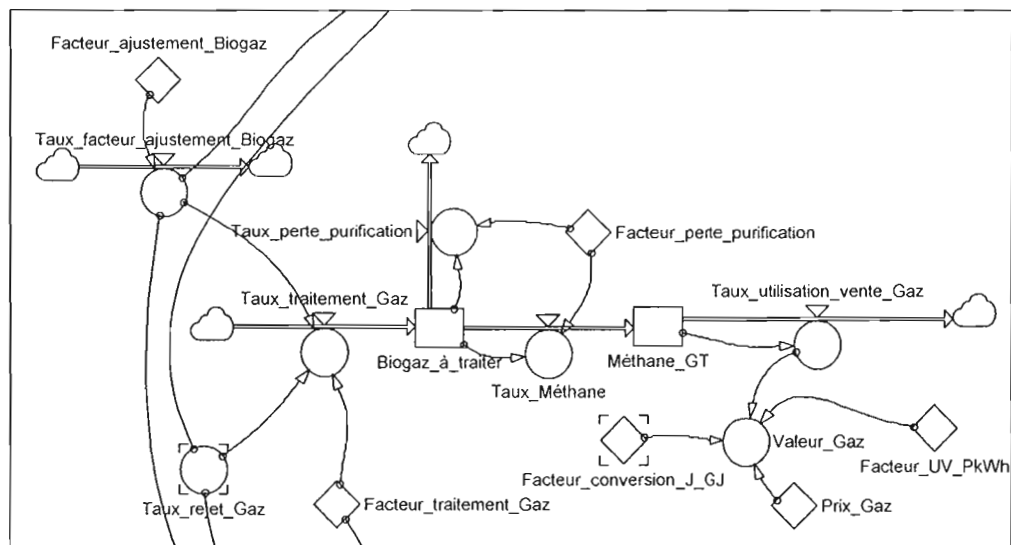
Le *Taux de perte* représente la portion du gaz émis post digestion, lequel dans certains cas, sera brûlé. La fonction suivante montre que le *Taux de perte* est égal au *Taux rejet Gaz* multiplié par le *Facteur utilisation torchère*.

$$\text{Taux\_de\_perte} = \text{Taux\_rejet\_Gaz} * \text{Facteur\_utilisation\_torchère}$$

#### 4.4.3.3 Le gaz purifié

Cette section présente le mécanisme de modélisation de l'extrant gaz purifié dans le modèle. La figure 43 montre le mécanisme de sortie du gaz purifié dans le modèle alors que le tableau 26 présente les équations relatives au mécanisme.

**Figure 43 - Entrant 1 : Gaz purifié**



**Tableau 26 - Équations : Gaz**

$\text{Taux\_de\_rejet\_de\_Gaz} =$
$\text{Matières\_résiduelles} * (\text{Facteur\_biogaz\_digesta}) * \text{Facteur\_ajustement\_Biogaz}$
$\text{Taux\_de\_traitement} = \text{Taux\_de\_rejet\_de\_Gaz} * (1 * \text{Facteur\_de\_traitement})$
$\text{Taux\_facteur\_ajustement\_Biogaz} = \text{Facteur\_ajustement\_Biogaz}$
$\text{Taux\_perte\_purification} = \text{Biogaz\_à\_traiter} * \text{Facteur\_perte\_purification}$
$\text{Taux\_méthane} = \text{Biogaz\_à\_traiter} * (1 - \text{Facteur\_perte\_purification})$
$\text{Taux\_Utilisation\_Vente\_Gaz} = \text{Méthane\_GT} * \text{Facteur\_UV\_PkWh}$
$\text{Valeur\_Gaz} = \text{Taux\_Utilisation\_Vente} * \text{Facteur\_conversion\_m3\_kWh} * \text{Prix\_Gaz}$

Le *Taux rejet Gaz* représente l'un des deux extrants post digestion anaérobie : le gaz. La fonction suivante montre l'origine du *Taux rejet Gaz*. Il s'agit de multiplier les *Matières résiduelles* par le *Facteur biogaz digesta* et le *Facteur ajustement biogaz*.

$$\text{Taux\_rejet\_Gaz} = \text{Matières\_résiduelles} * (\text{Facteur\_biogaz\_digesta}) * \text{Facteur\_ajustement\_Biogaz}$$

Le *Taux traitement Gaz* représente la portion de gaz qui sera purifié. La fonction suivante montre le *Taux traitement Gaz* résulte de la multiplication du *Taux rejet Gaz* par le *Facteur traitement Gaz*.

$$\text{Taux\_traitement\_Gaz} = \text{Taux\_rejet\_Gaz} * \text{Facteur\_traitement\_Gaz}$$

Le *Taux facteur ajustement Biogaz* permet de fournir le flux de gaz aux diverses sections du modèle, notamment le *Taux perte Gaz*, le *Taux traitement Gaz* et le *Taux utilisation vente GNT*.

$$\text{Taux\_facteur\_ajustement\_Biogaz} = \text{Facteur\_ajustement\_Biogaz}$$

Le *Taux perte purification* représente la portion des éléments corrosifs retirés du *Biogaz* à traiter.

$$\text{Taux\_perte\_purification} = \text{Biogaz\_à\_traiter} * \text{Facteur\_perte\_purification}$$

Le *Taux Méthane* représente la portion purifiée du biogaz : le méthane. La fonction suivante montre le *Taux Méthane* égal au *Biogaz à traiter* multiplié par la différence entre la différence de 1 et du *Facteur perte purification*.

$$\text{Taux\_de\_Méthane} = \text{Biogaz\_à\_traiter} * (1 - \text{Facteur\_perte\_purification})$$

Le *Taux utilisation vente Gaz* multiplié par le *Facteur UV PkWh* représente la portion du gaz traité qui sera destinée à l'utilisation ou la vente.

$$\text{Taux\_utilisation\_vente\_Gaz} = \text{Méthane\_GT} * \text{Facteur\_UV\_PkWh}$$

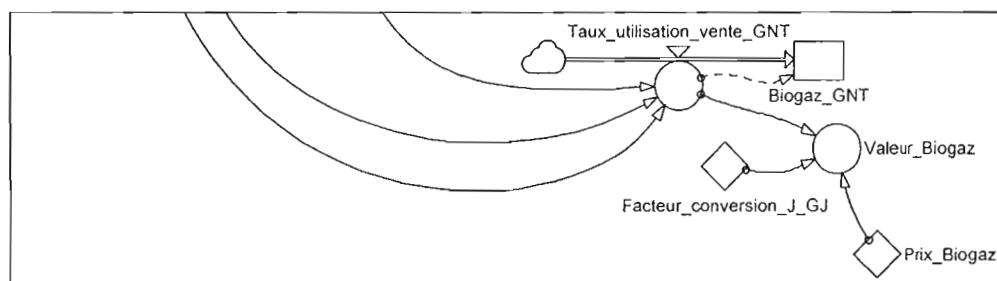
La *Valeur Gaz* représente la valeur monétaire provenant de la vente du gaz. La fonction suivante montre que la *Valeur Gaz* dépend du *Taux Utilisation Vente* multiplié par un *Facteur de conversion m3 kWh* multiplié par le *Prix Gaz*.

$$\text{Valeur\_Gaz} = \text{Taux\_Utilisation\_Vente} * \text{Facteur\_conversion\_m3\_kWh} * \text{Prix\_Gaz}$$

#### 4.4.3.4 Le biogaz

Cette section présente le mécanisme de modélisation de l'extrait biogaz dans le modèle. La figure 44 montre le mécanisme de sortie du biogaz dans le modèle alors que le tableau 27 présente les équations relatives au mécanisme.

**Figure 44 - Extrait 2 : Biogaz**



**Tableau 27 - Biogaz : Équations**

$\text{Taux\_Utilisation\_Vente\_GNT} = \text{Taux\_de\_rejet\_de\_Gaz} * (1 - \text{Facteur\_de\_traitement})$
$\text{Valeur\_Biogaz} =$ $(\text{Taux\_Utilisation\_Vente\_GNT} * \text{Facteur\_conversion\_m3\_kWh}) * \text{Prix\_Biogaz}$

Le *Taux utilisation vente GNT* représente la portion du gaz non traité qui sera destinée à l'utilisation ou la vente. La fonction *Taux utilisation vente GNT* montre qu'il faut multiplier le *Taux rejet Gaz* avec la différence de 1 moins le *Facteur traitement Gaz*.

$$\text{Taux\_Utilisation\_Vente\_GNT} = \text{Taux\_rejet\_Gaz} * (1 - \text{Facteur\_traitement\_Gaz})$$

La *Valeur Biogaz* représente la valeur monétaire provenant de la vente du biogaz. La fonction suivante montre que la *Valeur Biogaz* dépend du *Taux Utilisation Vente GNT* multiplié par un *Facteur de conversion J GJ* multiplié par le *Prix Biogaz*.

$$\text{Valeur\_Biogaz} =$$

$$(\text{Taux\_Utilisation\_Vente\_GNT} * \text{Facteur\_conversion\_m3\_kWh}) * \text{Prix\_Biogaz}$$

#### 4.4.3.5 L'électricité

Cette section présente le mécanisme de modélisation de l'extrant électricité dans le modèle. La figure 45 montre le mécanisme de sortie de l'électricité dans le modèle alors que le tableau 28 présente les équations relatives au mécanisme.

Figure 45 - Entrant 3 : kWh

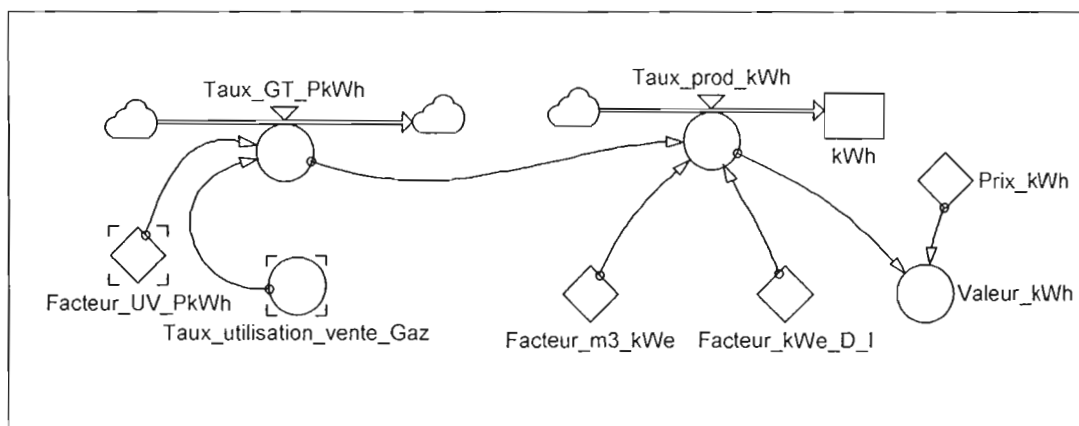


Tableau 28 - Équations : Électricité

$\text{Taux\_Utilisation\_Vente\_GNT} = \text{Taux\_de\_rejet\_de\_Gaz} * (1 - \text{Facteur\_de\_traitement})$
$\text{Taux\_GT\_PkWh} = \text{Taux\_utilisation\_vente\_Gaz} * (1 - \text{Facteur\_UV\_PkWh})$
$\text{Taux\_prod\_kWh} = \text{Taux\_GT\_PkWh} * \text{Facteur\_m3\_kWe} * \text{Facteur\_kWe\_D\_I}$
$\text{Valeur\_kWh} = \text{Taux\_GT\_prod\_kWh} * \text{Prix\_kWh}$

Le *Taux utilisation vente Gaz* multiplié par le facteur inverse du *Facteur UV PkWh* représente la portion du gaz traité destinée à la production d'électricité.

$$\text{Taux\_utilisation\_vente\_GNT} = \text{Taux\_rejet\_Gaz} * (1 - \text{Facteur\_traitement\_Gaz})$$

Le *Taux GT PkWh* représente la quantité de méthane destiné à la production d'électricité. Ce facteur est multiplié par le facteur inverse de l'Utilisation Vente Production kWh (*UV PkWh*).

$$\text{Taux\_GT\_PkWh} = \text{Taux\_utilisation\_vente\_Gaz} * (1 - \text{Facteur\_UV\_PkWh})$$

Le *Taux prod kWh* représente le mécanisme de transformation du gaz en électricité. Pour ce faire, le gaz provenant du *Taux GT PkWh* est multiplié par le *Facteur m3 kWe* et le *Facteur kWe D I*.



$$\text{Taux\_prod\_kWh} = \text{Taux\_GT\_PkWh} * \text{Facteur\_m3\_kWe} * \text{Facteur\_kWe\_D\_I}$$

La *Valeur kWh* représente la valeur monétaire provenant de la vente de l'électricité. La fonction suivante montre que la *Valeur kWh* dépend du *Taux prod kWh* multiplié par le *Prix kWh*.

$$\text{Valeur\_kWh} = \text{Taux\_prod\_kWh} * \text{Prix\_kWh}$$

La figure 46 montre le mécanisme d'ajustement de la capacité de la génératrice dans le modèle. Le tableau 29 présente les équations liées à ce mécanisme.

**Figure 46 - Capacité génératrice**

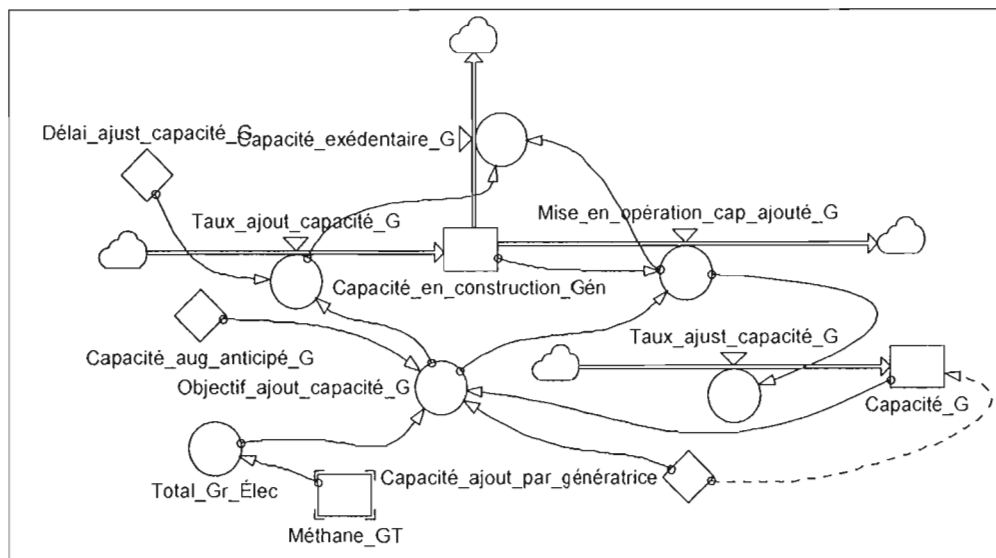


Tableau 29 - Équations : Capacité génératrice

Total_Gr_Élec = Méthane_GT
Objectif_ajout_capacité_G = IF(Total_Gr_Élec >= Capacité_aug_anticipé_G * Capacité_G, Capacité_ajout_par_génératrice OTHERWISE, 0)
Tx_ajout_capacité_G = Objectif_ajout_capacité_G / Délai_ajust_capacité_G
Capacité_exédentaire_G = IF(Mise_en_opération_cap_ajouté_G > 0, Tx_ajout_capacité_G OTHERWISE, 0)
Mise_en_opération_cap_ajouté_G = IF(Capacité_en_construction_Gén >= Objectif_ajout_capacité_G, MAX(Capacité_en_construction_Gén, 0) OTHERWISE, 0)
Taux_ajust_capacité_G = Mise_en_opération_cap_ajouté_G
Capacité_G = Capacité_ajout_par_génératrice

Le *Total Gr Élec* représente le volume de gaz traité attribué à la production d'électricité. La formule suivante montre que le *Total Gr Élec* est égal au niveau de *Méthane GT*.

$$\text{Total\_Gr\_Élec} = \text{Méthane\_GT}$$

L'*Objectif ajout capacité G* offre au système une capacité d'auto ajustement de la capacité de la génératrice. La formule suivante possède une fonction IF( $X \geq Y, Z$  OTHERWISE, 0) qui se lit ainsi : Si X est plus grand ou égal qu'Y alors Z, si non zéro. La fonction montre que si le *Total Gr Élec* est  $\geq$  *Capacité aug anticipé G* multiplié par *Capacité G* alors utilise la *Capacité ajout par génératrice*, sinon prend 0.

$$\begin{aligned} \text{Total Gr Élec} = \\ \text{IF}(\text{Total\_à\_valo} \geq \text{Capacité\_aug\_anticipé\_G} * \text{Capacité\_G}, \text{Capacité\_ajout\_par\_générateur} \\ \text{OTHERWISE, 0}) \end{aligned}$$

Le *Tx ajout capacité G* représente la capacité augmentée suivant l'*Objectif ajout de capacité G* divisé par le *Délais ajout capacité G*. La fonction suivante montre le calcul de ce ratio.

$$\text{Tx\_ajout\_capacité\_G} = \text{Objectif\_ajout\_capacité\_G} / \text{Délai\_ajust\_capacité\_G}$$

La Capacité excédentaire G représente l'ajustement de la capacité de la génératrice qui retire la capacité en construction lorsque la construction est terminée.

$$\text{Capacité\_excédentaire\_G} = \text{IF}(\text{Mise\_en\_opération\_cap\_ajouté\_G} > 0, \text{Tx\_ajout\_capacité\_G} \\ \text{OTHERWISE}, 0)$$

*Mise en opération cap ajouté G* représente la fonctionnalité qui permet d'ajouter réellement la capacité. La formule contient une fonction IF puis un MAX. La fonction MAX (X,Y) se lit ainsi : la fonction choisie de X ou de Y le nombre le plus grand. Dans le cas de cette fonction particulière, la fonction MAX a pour objectif d'empêcher le modèle de prendre des valeurs négatives. La fonction suivante montre que la *Mise en opération cap ajouté G* sera égale au MAX entre la *Capacité en construction G* et zéro, si la *Capacité en construction D* est  $\geq$  que l'*Objectif ajout capacité D*, sinon elle sera de zéro.

$$\text{Mise\_en\_opération\_cap\_ajouté\_G} = \\ \text{IF}(\text{Capacité\_en\_construction\_G} \geq \text{Objectif\_ajout\_capacité\_G}, \\ \text{MAX}(\text{Capacité\_en\_construction\_G}, 0) \text{ OTHERWISE}, 0)$$

Le *Taux ajust capacité G* représente l'effet de la *Mise en opération cap ajouté G* au niveau de la *Capacité G*. La fonction montre que le *Taux ajust capacité G* est égal à la *Mise en opération cap ajouté G*.

$$\text{Taux\_ajust\_capacité\_G} = \text{Mise\_en\_opération\_cap\_ajouté\_G}$$

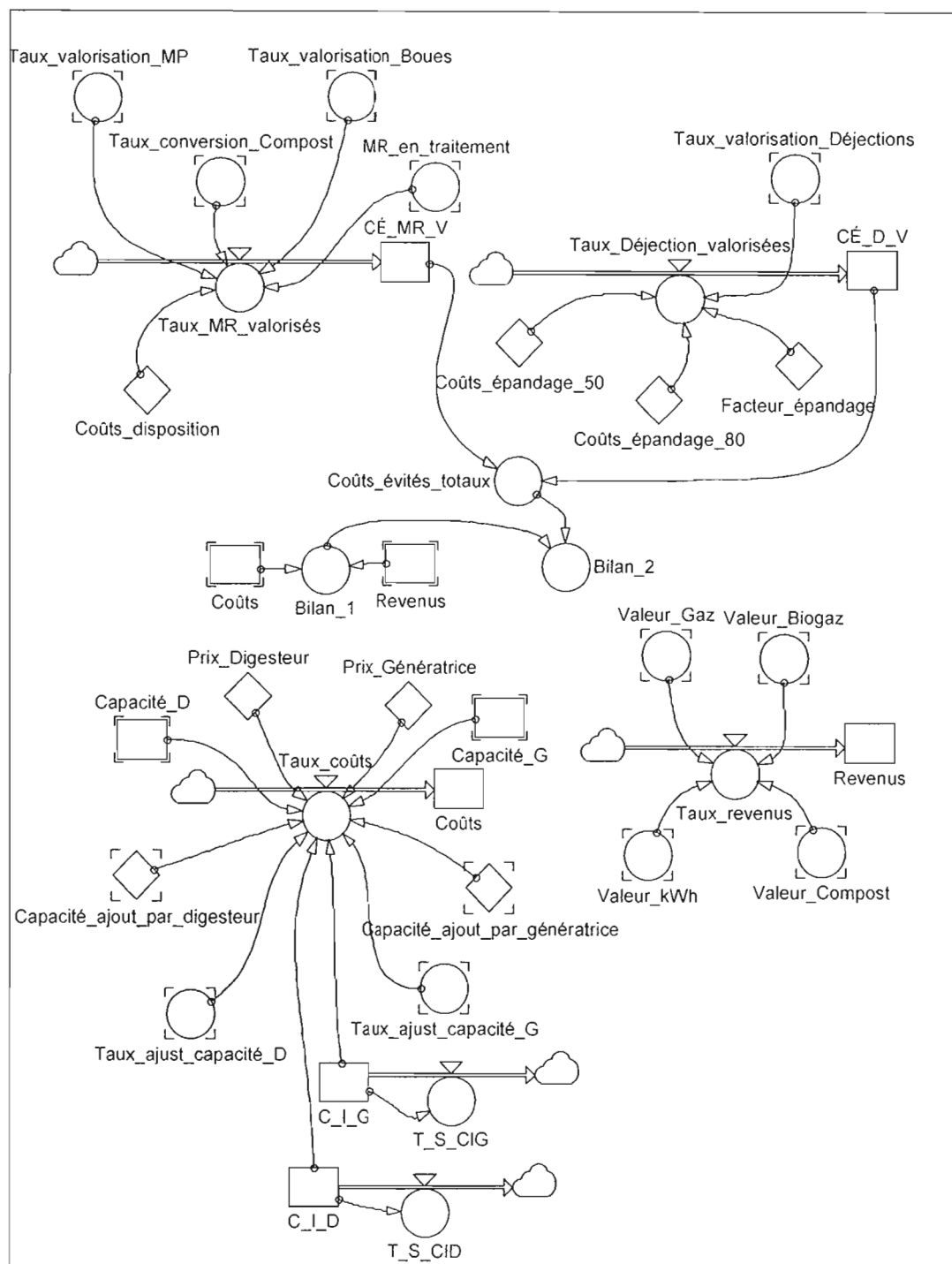
La *Capacité G* représente la capacité cumulée les génératrices. L'équation suivante montre que la *Capacité G* est égale à la capacité initiale du modèle qui est égale à la *Capacité ajout par génératrice*.

$$\text{Capacité\_G} = \text{Capacité\_ajout\_par\_génératrice}$$

#### 4.4.4 La partie IV : Les investissements et revenus

Un des objectifs possibles du modèle consiste à évaluer la rentabilité du système. La figure 47 montre les calculs élaborés dans cette optique. Cette portion contient plusieurs des variables de taux déjà présentés. Ainsi, seuls les nouveaux taux et variables seront présentés. L'ensemble des équations sont montrées au tableau 30. La présentation des équations suit le tableau.

Figure 47 - Investissements et revenus



**Tableau 30 - Équations : Investissements et revenus**

$\text{Taux\_MR\_valorisés} = \text{Taux\_valorisation\_MP} * \text{Coûts\_disposition}$
$\text{Taux\_Déjections\_valorisées} = \text{Taux\_valorisation\_Déjections}$
$\text{Coûts\_évités\_totaux} = \text{CÉ\_MR\_V} + \text{CÉ\_D\_V}$
$\begin{aligned} \text{Taux\_coûts} = & (\text{Capacité\_D}/\text{Capacité\_ajout\_par\_digesteur}) * (\text{Taux\_ajust\_capacité\_D}/\text{Capacité\_D}) * \text{Prix\_Digesteur} + \\ & (\text{C\_I\_D}/\text{Capacité\_D}) * \text{Prix\_Digesteur} + \\ & (\text{Capacité\_G}/\text{Capacité\_ajout\_par\_génératrice}) * (\text{Taux\_ajust\_capacité\_G}/\text{Capacité\_G}) * \text{Prix\_Génératrice} + \\ & (\text{C\_I\_G}/\text{Capacité\_G}) * \text{Prix\_Génératrice} \end{aligned}$
$\text{T\_S\_CIG} = \text{CIG}$
$\text{T\_S\_CID} = \text{CID}$
$\text{Taux\_revenus} = \text{Valeur\_Biogaz} + \text{Valeur\_Gaz} + \text{Valeur\_kWh} + \text{Valeur\_compost}$
$\text{Bilan\_1} = \text{Revenus} - \text{Coûts}$
$\text{Bilan\_2} = \text{Coûts\_évités\_totaux} + \text{Bilan\_1}$

Le *Taux MR valorisés* représente le flux provenant des *Taux valorisation MP* multiplié par les *Coûts disposition*.

$$\text{Taux\_MR\_valorisés} = \text{Taux\_valorisation\_MP} * \text{Coûts disposition}$$

Le *Taux déjections valorisés* représente le *Taux valorisation déjections*. Ce flux de déjections a été isolé des autres flux, afin de faciliter la modification du modèle pour ajouter une dynamique de coûts alternative. Ces coûts représentent le *Taux Déjections valorisées* multiplié par un *Facteur d'épandage* et par les *coûts d'épandage 50 et 80*. Les coûts d'épandage incluent les coûts de transport et d'épandage. Se référant à la section 5.4.1, les éleveurs possèdent quatre dynamiques de coûts, soit moins de 2 km, 20, 50 et 80 km. Dans le cadre de cet exercice de calculs de coûts évités, les déjections sont modélisées pour représenter les dynamiques de coûts de 50 et 80 km. Ceci en se basant sur le fait que les

producteurs qui peuvent épandre localement à peu de frais, n'effectuent pas de transport supplémentaire pour apporter leurs déjections au centre de digestion anaérobie.

$$\begin{aligned} \text{Taux\_déjections\_valorisées} = \\ (\text{Taux\_Déjection\_valorisées} * \text{Facteur\_épandage} * \text{Coûts\_épandage\_50}) + \\ (\text{Taux\_Déjection\_valorisées} * \text{Facteur\_épandage} * \text{Coûts\_épandage\_80}) \end{aligned}$$

Les *Coûts évités totaux* représentent le cumul des coûts évités MR valorisés  $CÉ_{MR,V}$  et des coûts évités déjections valorisées  $CÉ_{D,V}$  dont la dynamique de coûts est différente.

$$\text{Coûts\_évités\_totaux} = CÉ_{MR,V} + CÉ_{D,V}$$

Le *Taux coûts* représente les coûts relatifs aux gros équipements soit les digesteurs et les génératrices. La formule montrée présente, séparée par une addition, deux équations, une pour chacun des équipements soit les digesteurs et les génératrices. La première partie de l'équation montre le mécanisme de calcul pour les digesteurs. Ainsi la *Capacité D* sur la *Capacité ajout par digesteur* agit communément avec le *Taux ajust capacité D* sur *Capacité D* pour indiquer au modèle qu'une nouvelle génératrice est mise en fonction. Lorsque mise en fonction, le coefficient unitaire est multiplié par le prix Digesteur afin de refléter le déboursé relatif à l'achat de l'équipement. Ceci explique la première partie du calcul. La seconde partie sert à ajouter une capacité initiale au modèle. Ainsi, la capacité initiale digesteur ( $CID$ ) sur la *Capacité D* est multiplié par le *Prix Digesteur*. Ce mécanisme contraint le modèle à intégrer l'achat du premier digesteur à la période  $t = 0$ . La seconde l'équation montre la même dynamique appliquée à l'achat des génératrices. Le cumulatif des deux équations reflète les coûts relatifs aux achats d'équipements

$$\begin{aligned}
\text{Taux\_coûts} = & \\
& (\text{Capacité\_D/Capacité\_ajout\_par\_digesteur}) * \\
& (\text{Taux\_ajust\_capacité\_D/Capacité\_D}) * \text{Prix\_Digesteur} + \\
& (\text{C\_I\_D/Capacité\_D}) * \text{Prix\_Digesteur} \\
& + \\
& (\text{Capacité\_G/Capacité\_ajout\_par\_génératrice}) * \\
& (\text{Taux\_ajust\_capacité\_G/Capacité\_ajout\_par\_génératrice}) * \text{Prix\_Génératrice} + \\
& (\text{C\_I\_G/Capacité\_G}) * \text{Prix\_Génératrice}
\end{aligned}$$

Le Taux Sortant de la Capacité Initiale Génératrice (*TS CIG*) représente le taux de sortie égal à la variable de niveau Capacité Initiale Génératrice (*CIG*). Le *TS CIG* permet de vider la variable CIG afin que le modèle ne comptabilise pas deux fois le déboursé lié à l'achat de la première génératrice.

$$\text{T\_S\_CIG} = \text{CIG}$$

Le Taux Sortant de la Capacité Initiale Digesteur (*TS CID*) représente le taux de sortie égal à la variable de niveau Capacité Initiale Digesteur (*CID*). Le *TS CID* permet de vider la variable CID afin que le modèle ne comptabilise pas deux fois le déboursé lié à l'achat du premier digesteur.

$$\text{T\_S\_CID} = \text{CID}$$

Le *Taux revenus* représente le cumul des *Coûts évités* et des valeurs des extrants. L'addition suivante montre ceci.

$$\text{Taux\_revenus} = \text{Valeur\_Biogaz} + \text{Valeur\_compost} + \text{Valeur\_Gaz} + \text{Valeur\_kWh}$$

Finalement le *Bilan 1* montre la différence entre les taux : *Revenus* et *Taux coûts*.

$$\text{Bilan 1} = \text{Revenus} - \text{Taux\_coûts}$$



Le *Bilan 2* représente la combinaison des *Coûts évités* et du *Bilan 1*.

$$\text{Bilan 2} = \text{Coûts}_{\text{évités}} + \text{Bilan 1}$$

#### 4.5 Calibrage et évaluation du modèle

Le calibrage est effectué avec quatre tests présentés au tableau 31. L'évaluation du modèle est montrée à la section 4.5.1, tandis que la section 4.5.2 est axée sur les caractéristiques souhaitées d'un modèle.

**Tableau 31 - Test de calibrage**

Tests	Description du test	Résultats
Test des intrants à valeur nulle	<p>Ce test vérifie que le modèle ne crée pas d'extrait lorsque aucun intrant n'est simulé.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les inventaires animaux (4) sont à zéro</li> <li>• Production Boues est à zéro</li> <li>• Production MP est à zéro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valeur Compost à 0\$</li> <li>• Valeur Gaz à 0\$</li> <li>• Valeur Biogaz à 0\$</li> <li>• Valeur kWh à 0\$</li> </ul>
Test Intrants aux valeurs extrêmes	<p>Ce test vérifie que le modèle supporte les valeurs extrêmes et que le comportement du système n'est pas affecté.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Les inventaires animaux (4) sont à 1000000</li> <li>• Production Boues est à 1000000</li> <li>• Production MP est à 1000000</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valeur Compost = MSQ<sup>1</sup> à t.26</li> <li>• Valeur Gaz à = MSQ à t. 26</li> <li>• Valeur Biogaz = MSQ à t. 26</li> <li>• Valeur kWh = MSQ à t. 26</li> </ul>
Test des valorisations autre	<p>Ce test vérifie que lorsque les intrants sont détournés le niveau des Matières résiduelles est nul.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Besoin agronomique à 1 000 000</li> <li>• FER MP à zéro</li> <li>• FER Boues à zéro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Matières résiduelles à 0</li> </ul>
Test de la torchère et disposition compost	<p>Ce test vérifie que lorsque les gaz sont brûlés et que le digesta condensé est disposé, que le modèle ne crée pas d'extraits.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Facteur utilisation torchère à 1</li> <li>• Facteur compost disposition à 1</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Valeur Compost à 0\$</li> <li>• Valeur Gaz à 0\$</li> <li>• Valeur Biogaz à 0\$</li> <li>• Valeur kWh à 0\$</li> </ul>

1- MSQ : maintient du statu quo

#### 4.5.1 Tests d'évaluation

L'évaluation d'un modèle s'effectue sur deux plans. Ce sont à la fois les validités interne et externe qui doivent être testées. Les tests suivants ont été effectués : le test des frontières, l'évaluation de la structure, le test des conditions extrêmes et l'estimation des paramètres. Ces tests, inspirés de Sterman, ont été présentés et décrits à la section 3.5.

##### 4.5.1.1 Test des frontières

Pour les frontières du système, l'ensemble des concepts fondamentaux sont endogènes au modèle. Basé sur des caractéristiques mathématiques, le comportement du modèle n'est pas affecté par le changement des frontières du système. Seules des valeurs initiales inadéquates peuvent nuire aux changements des frontières. Celles-ci ont été spécifiquement mises en place pour l'étude de cas. Ces valeurs initiales sont facilement ajustables en vue de modéliser un système dont les frontières seraient différentes. Notons que le modèle a été créé dans le but d'évaluer un processus d'adoption graduel de la digestion anaérobie.

##### 4.5.1.2 Évaluation de la structure

La structure du modèle est consistante avec le savoir descriptif et les connaissances disponibles pour l'élaboration du modèle. Le niveau d'agrégation est adéquat en fonction de la documentation et de l'enrichissement possible du modèle. L'ensemble des équations présentées respecte les lois universelles de conservation. Certains ajustements ont été rendus nécessaires afin de représenter le modèle de digestion fidèlement. L'ensemble des facteurs décisionnels montre que le modèle tient compte du comportement des acteurs à l'intérieur du système.

#### 4.5.1.3 Test des conditions extrêmes

L'ensemble des équations ont été testées avec des valeurs extrêmes pour vérifier si le sens de l'équation n'est pas affecté par les paramètres élevés ou les chocs extrêmes. Le tableau 31 précédemment montré illustre ce fait.

#### 4.5.1.4 Test d'estimation des paramètres

Au niveau de la validité interne, il faut tester que le modèle se comporte de manière logique. Le tableau 32 montre des comparaisons entre les résultats estimés par MATTEUS et ceux produits par le modèle N-T. À la période 7, les données du modèle représentant environ 35 % des volumes inscrits dans MATTEUS, on remarque que les données sont suffisamment proches des données du modèle original. Sur 10 ans, on observe une faible variation. Dans le cadre de cette recherche, l'objectif premier est une compréhension du système et non pas une prédiction précise.

**Tableau 32 - Estimation des paramètres**

Test	Périodes	Compost			kWh		
		Modèle	MATTEUS	Écarts	Modèle	MATTEUS	Écarts
Test à 36 % (base annuelle)	t. 7	33 499	35 762	94%	45 096	43 780	103%
Test à 100 % (base annuelle)	t. 510	96 981	99 340	98%	130 557	121 611	107%

Pour la modélisation des coûts, seuls deux équipements ont été modélisés. Le tableau 33 montre les coûts relatifs des équipements présents et absents du modèle. Les explications sur le choix de modéliser seuls deux des équipements sont présentées à la section 5.6.

**Tableau 33 - Coûts des équipements présents et absents du modèle**

<b>MATTEUS</b>		<b>Modèle</b>	
		Absent modèle	Présent modèle
<b>Investissement (\$)</b>	<b>(\$)</b>	<b>(\$)</b>	<b>(\$)</b>
Déchiqueteur	1 095 621	1 095 621	-
Digester anaérobie	20 159 065	-	20 159 065
Déshydratation	1 716 202	1 716 202	-
Plateforme compostage	3 554 289	3 554 289	-
Torchère	580 980	580 980	-
Purification du biogaz	219 389	219 389	-
Génératrice	16 492 915	-	16 492 915
Chaudière	0	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>43 818 461</b>	<b>7 166 481</b>	<b>36 651 980</b>

En ce qui concerne la présence d'une contrepartie équivalente dans un système réel, notons que le modèle est basé sur les données disponibles dans MATTEUS. Les données réelles ne sont pas disponibles pour modélisation puisque ce système n'existe pas. Par contre, les données et les sources sur lesquelles reposent les calculs dans MATTEUS sont documentées. Cette étude cite deux documents de référence quant aux références de données de MATTEUS; voir Laflamme et Poulsen. Selon les limites du logiciel de simulation employé pour la modélisation, certains facteurs ne possèdent pas un équivalent direct dans MATTEUS. Afin de palier les limites fonctionnelles du programme, certains facteurs ont été ventilés en un facteur premier sur une base de 100 couplé à un facteur d'ajustement agissant sur le taux calculé avec le facteur premier. En combinant ces deux facteurs, il est possible de comparer la donnée avec un équivalent dans MATTEUS. La section 5.4.2 montre les tableaux de calculs des facteurs dont ceux qui nécessitent un facteur d'ajustement.

#### 4.5.2 Évaluation du modèle

L'évaluation du modèle est une évaluation qualitative selon ses caractéristiques. Les caractéristiques désirables des modèles sont présentées à la section 3.5. Selon les caractéristiques, un modèle est plutôt axé sur la prévision ou plutôt sur la compréhension. Le présent modèle a pour objectif l'augmentation de la compréhension. En fonction des neuf caractéristiques élaborées par Randers (1980), le modèle semble être un hybride des deux objectifs des modèles : à la fois prédiction et augmentation de la compréhension.

#### 4.6 Scénarios de recherche

L'avantage premier de la DS est d'offrir aux chercheurs la possibilité de tester des hypothèses. Dans le cadre de cette étude, la simulation de deux scénarios permet de répondre aux questions de recherche proposées dans l'introduction. Les sections suivantes présentent les scénarios A et B. La présentation d'un scénario de référence est expliquée à la section 7.3.

##### 4.6.1 Scénario A - Projet pilote

Le scénario projet pilote représente un projet qui rejoint 20 % de la population de la MRC. Ce premier scénario permet de tester les rendements des diverses façons de valoriser les gaz de digestion : biogaz, gaz naturel ou production d'électricité. Ce scénario permet de visualiser économiquement les choix d'installation ainsi que les déboursés nécessaires en fonction de ceux-ci.

##### 4.6.2 Scénario B - Électricité

L'adoption de la digestion anaérobie (DA) dépend de plusieurs acteurs. Tel que présenté dans le chapitre 2, les acteurs agricoles, municipaux et résidentiels font face à des contraintes différentes. La simulation A est une analyse de sensibilité face au facteur d'adoption. Le tableau 34 présente les contraintes et objectifs par catégorie d'acteurs.

**Tableau 34 - Contraintes et objectifs des acteurs**

Catégorie d'acteurs	Contraintes	Objectifs
<b>Agricole (ZAL)</b> Déjections animales	La norme Phosphore de 2008, 2010	Valoriser l'excédant Lisier/Fumier
<b>Municipal</b> Boues (3 types)	La politique Québécoise de gestion des matières résiduelle 1998-2008	3RV-E Via le PGMR
<b>Municipal</b> (Collecte de MP)		Valorisation de 60% des matières putrescibles
<b>Résidentiel</b> (participation citoyenne)	Sensibilisation et conscientisation de la population	Adoption volontaire bac brun

Au niveau de la mise en place de la digestion anaérobique et de la génératrice électrique, cette étude cherche non seulement à évaluer les coûts mais aussi à prévoir l'échéancier d'investissement, puisque l'achat de ces systèmes demande des investissements importants, l'approche d'une adoption incrémentale sera privilégiée. Ainsi, le scénario A répond à la question suivante. Pour lancer ce projet, étape par étape, en respectant la croissance du volume des MR à valoriser, quel pourrait être le calendrier d'investissement en considérant seulement la production d'électricité avec les gaz produits?

Au niveau des acteurs agricoles, le MAPAQ constate un surplus de 2 687 161 Kg de  $P_2O_5$  selon la technique du bilan de surface pour la MRC de la Nouvelle-Beauce en 2007. Le tableau 35 illustre l'effet de la mise en application de la norme phosphore.

**Tableau 35 - Effets de l'application de la norme phosphore**

Année d'application	2005-2008	2008-2010	2010-
Apport maximal de phosphore selon la capacité de captation des plantes	200 %	133 %	100 %
Surplus estimés (basé sur le surplus estimé de 2007 du MAPAQ)	3 582 593Kg	3 701 431Kg	3 942 709Kg

Le système étudié utilise trois intrants, le scénario A propose la variation de l'adoption d'un de ces trois facteurs; soit les résidus putrescibles. Comme les boues représentent déjà des activités de collectes, de traitements et d'enfouissement, les chercheurs avancent le postulat suivant : les boues sont entièrement valorisées, et ce, dès l'établissement du digesteur.

Au niveau de la digestion anaérobique, notons la présence d'autres contraintes notamment de prétraitement, de volume d'efficacité et de coûts. Suivant une analyse préliminaire du système, notons que la capacité demandée pour traiter le volume de matières résiduelles évaluées est 20 000 m<sup>3</sup>. Dans le cadre de cette recherche, seule l'utilisation des digesteurs mixtes (par brassage) a été privilégiée pour leur rapport efficacité/coût. Or, l'industrie n'offre pas de digesteurs de ce volume pour des raisons techniques. Ainsi, on remarque que les acteurs se rabattent sur l'achat de digesteurs de plus petite taille. La figure 48 présente l'installation de huit digesteurs de Huckabay Ridge aux États-Unis (2007).

**Figure 48 - Les digesteurs de Huckabay Ridge**



Source : Environmental Power (2007)

Suivant les limites fonctionnelles des digesteurs, les scénarios A et B proposent l'adoption incrémentale de digesteurs et de génératrices en fonction des volumes à traiter. Le scénario d'investissement est donc graduel en ce qui se rapporte aux investissements.

Au niveau de la transformation de biogaz en électricité, les chercheurs ont préféré les équipements de type moteurs électriques aux autres types de turbines et piles dont les investissements et les avantages n'ont pas été jugés suffisants.

Selon les chercheurs, ce scénario représente un scénario d'adoption plausible pour ce type de projet.

#### 4.7 Conclusion

Ce chapitre a présenté en trois sections l'ensemble du processus d'élaboration du modèle dans le cadre de la dynamique des systèmes. La section 4.2 montre le diagramme d'influence ainsi que les explications quant aux boucles présentes dans le diagramme. La section 4.3 présente les variables du modèle. La section 4.4 décrit le modèle niveaux-taux. Les équations sont présentées pour les différents sous-secteurs du modèle. La section 4.5 présente le calibrage du modèle en plus des tests et de l'évaluation du modèle. La section 4.6 présente les scénarios de recherche.



## CHAPITRE V

### DÉMARCHE DE CALCULS EMPIRIQUES

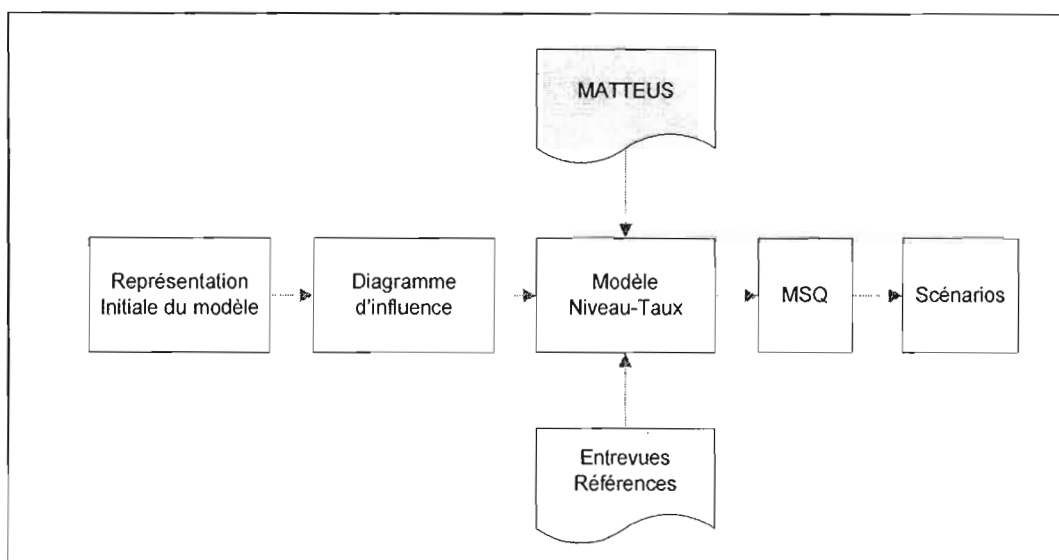
#### 5.1 Introduction

L'élaboration de ce projet de recherche repose sur plusieurs calculs. Ce chapitre montre les étapes suivies dans la réalisation d'hypothèses chiffrées basées sur les données disponibles. Les sections 5.1.1. et 5.1.2. présentent les deux catégories de provenance des données alors que la section 5.2 montre les valeurs initiales du modèle. La section 5.3 présente les données relatives à la norme phosphore. La section 5.4 passe en revue l'ensemble des calculs relatifs aux ratios nécessaires à la modélisation. Les calculs du module économique sont présentés à la section 5.5. En 5.6 sont présentés les équipements et valeurs non modélisés. La section 5.7 présente une synthèse du chapitre.

L'information sur les sujets de recherche étant parfois peu disponible ou inexistante, de nombreux experts ont été consultés. Lorsque l'information était non disponible, les experts consultés ont fourni des approximations qui, en fonction de leurs champs d'expertises s'approchent de la réalité. Notons que la simulation, telle qu'utilisée dans l'approche de la DS, ne requiert pas nécessairement un degré élevé de précision des données. La présente recherche vise plutôt à augmenter la compréhension du système via des prévisions larges qui offrent aux décideurs un ordre de grandeur que la prévision exacte du comportement du système. C'est dans cette optique que la consultation d'experts a été jugée valable au niveau de certaines données non disponibles ou inexistantes.

En somme, le processus de modélisation est représenté à la figure 49. La consultation d'experts et les références fournies dans MATTEUS étant des compléments importants dans cette recherche. La figure suivante montre que la création du modèle niveaux-taux dépend de la conceptualisation du modèle provenant du DI, et des références provenant de MATTEUS et des entrevues et références citées dans le présent chapitre.

**Figure 49 - Conceptualisation du modèle niveaux-taux**



Suivant la réalisation du modèle, celui-ci sera calibré dans un scénario de référence nommé maintien du statu quo (MSQ). Ensuite, le modèle peut servir à l'évaluation de divers scénarios. Dans le cas présent, deux scénarios ont été étudiés.

#### 5.1.1 Données : références et consultation d'experts

Constante tout au long de la recherche, on note que les bases sur lesquelles reposent les calculs sont deux suppositions qui ont permis de cibler les données parfois présentées avec trop de détails ou parfois manquantes.

Dans la première situation, l'estimation d'une variable intermédiaire lorsque les données sont trop abondantes, ou présentées en trop grand détail, est ramenée à l'utilisation d'une seule donnée. Lorsque la littérature présente une fourchette de données, la donnée retenue pour le calcul est la médiane. Dans le cas d'une série de données, la moyenne a été considérée pour le calcul.

Dans le second cas, soit pour l'estimation des variables manquantes, des experts ont été consultés. Cette opération a été menée en un processus consultatif avec des experts du milieu. Lorsque possible, deux experts différents ont été consultés pour connaître un ordre de grandeur estimé par ceux-ci. Lorsque les deux experts ont fourni une estimation similaire, la donnée qui semble la plus précise a été retenue. Dans le cas où les variations entre les estimations sont significatives, d'autres experts sont sollicités. Lorsqu'un consensus entre experts est atteint, la donnée est retenue.

#### 5.1.2 Données : MATTEUS

Dans le cadre de la modélisation, il est nécessaire de construire les mécanismes de décisions sur des ratios réels. Dans le cadre de cette recherche, les auteurs ont pu compter sur l'expertise développée par M. Claude Laflamme, chercheur à l'institut de recherche d'Hydro-Québec.

M. Laflamme, en collaboration avec M. Labrecque, ont élaboré une méthode d'analyse technico-économique de traitements des eaux usées (MATTEUS). Ce chiffrier d'une quarantaine de feuilles englobe un vaste éventail de connaissances tant chimiques qu'électriques sur divers processus de valorisation de matières résiduelles. Cet outil, en cours de développement, s'avère important étant donné la nature des données nécessaires à la modélisation et la qualité des informations et calculs fournis par le chiffrier. Le rapport technique, *MATTEUS version 5. Tome 2 : Statistiques et propriétés*, décrit le programme ainsi :

« Le chiffrier MATTEUS a été développé dans le but de servir d'agent de première ligne pour la promotion de projets environnementaux, pour la promotion des implantations chez les exploitants, ou pour l'éducation et la formation, en plus d'alimenter des publications qui offriront une visibilité pour Hydro-Québec et pour ses partenaires en matières d'efficacité énergétique, d'énergie renouvelable et de développement durable. Il se base sur l'expertise d'Hydro-Québec en matière d'agencement des procédés de traitements à petite échelle, tout en appliquant le concept d'intégration énergétique au sein des entreprises. »

Ce chiffrier a été élaboré dans le logiciel Excel et son fonctionnement en est facilité. Des quelques quarante onglets disponibles dans MATTEUS, les suivants ont été utilisés :

- Effluent initial
- Déchiquetage
- Digestion anaérobie
- Déshydratation mécanique
- Compostage
- Gazéification
- Torchère
- Purification gaz
- Traitement gaz combustible
- Groupe électrogène
- Bilan de masse
- Résultats
- Données générales
- Bilan coûts
- Crédits

L'ensemble des données utilisées dans la préparation de ce chiffrier est disponible dans Laflamme (2007). En complément au rapport technique, il nous a été remis une copie d'un chapitre de « *Solid waste management* » (Poulsen, 2003) qui explique le processus de digestion anaérobie en détail. Ce chapitre a été présenté dans le cadre des cours en « *Solid waste management* » du professeur Poulsen au Danemark.

## 5.2 Les données initiales de MATTEUS

Afin d'établir la potentialité du système dans MATTEUS, il faut fournir les données de base selon les divers intrants. Le présent système rassemble trois types d'intrants : 1) les déjections animales, 2) les boues et 3) les matières putrescibles. Les sous-sections suivantes présentent la provenance des données, ainsi que les calculs et les interprétations exécutées par les chercheurs dans certains cas.

### 5.2.1 Les déjections animales

L'estimation des déjections animales peut se faire selon deux méthodes. La première se calcule selon la production annuelle des animaux. La seconde, quant à elle, repose sur l'inventaire de fin de période. Ces deux méthodes coexistent selon les différents élevages et le taux de rotation annuelle des animaux. Dans le cadre de cette recherche, la méthode choisie est celle des inventaires; puisque non seulement compatibles avec le chiffrier MATTEUS, les données d'inventaires sont plus facilement disponibles et celles-ci tiennent compte des vides sanitaires nécessaires à la production.

Au sujet des données sur les inventaires des différents élevages, les données proviennent de deux sources. L'Institut de la statistique du Québec (ISQ) fournit les données relatives aux inventaires des élevages bovins, porcins et ovins par région pour 2007 et par MRC pour 2004. L'inventaire de la production avicole provient d'un portrait de la MRC Nouvelle-Beauce créé par le MAPAQ puisque non disponible à l'ISQ.

L'ISQ présente les inventaires par région entre 1999 et 2004. Comme cette recherche cible l'inventaire de la MRC de la Nouvelle-Beauce et non pas de l'ensemble de la région soit la Région Chaudière-Appalaches. Il a été jugé préférable d'ajuster les données récentes en fonction des niveaux de production de la MRC pour la région. Afin de fournir les données les plus récentes, il a été jugé préférable d'utiliser les données par région de 2007 et d'estimer l'inventaire de la MRC en tenant compte de la part de production historique de la MRC dans sa région disponible entre 2001 et 2004. L'examen de ce ratio, inventaire Nouvelle-Beauce/Chaudière-Appalaches (N-B/C-A) sur quatre ans, montre que le pourcentage relatif de l'inventaire de la MRC dans sa région ne varie pas significativement et ce, pour chacune des productions visées pour le calcul. Les ratios N-B/C-A calculés pour les différents élevages sont : 5 % pour la production ovine, 17 % pour la production bovine et de 28 % pour la production porcine. À partir de ce ratio, il est possible d'estimer la quote part de la MRC à partir des données disponibles pour la région.

Le tableau 36 montre, dans la section de gauche, les inventaires par région tels que disponibles à l'ISQ. La portion de droite du tableau montre les ratios selon les divers élevages, ainsi que les inventaires calculés pour la MRC de la Nouvelle-Beauce.

**Tableau 36 - Calcul des inventaires pour la MRC Nouvelle-Beauce**

Inventaires d'élevage	Semestres 2007 Source : (ISQ 2008)		Ratio inventaire calculé (N-B/C-A) MRC/Région	Inventaire calculé MRC
	I	II		
<b>Chaudière-Appalaches</b>				<b>Nouvelle-Beauce</b>
<b>Ovins</b>				
Bélier	377	344	0,05	18
Brebis	11 472	11 943	0,05	585
Agneau de remplacement	1 567	1 413	0,05	75
Agneau (marché)	7 550	2 090	0,05	241
Total Ovins	20 966	15 790	0,05	919
<b>Bovins</b>				
Génisses pour l'abattage	3 061	5 223	0,17	704
Taureaux	2 328	2 077	0,17	374
Vaches laitières	82 084	84 158	0,17	14 131
Vaches de boucherie	41 248	34 699	0,17	6 455
Génisses de remplacement, type laitier	34 963	31 950	0,17	5 688
Génisses de remplacement, type de boucherie	4 449	3 070	0,17	639
Bouvillons	11 522	15 970	0,17	2 337
Veaux	78 590	71 045	0,17	12 719
Total Bovins	258 245	248 192	0,17	43 047
<b>Porcins</b>				
Verrat	2 924	2 102	0,28	704
Truie	143 096	135 280	0,28	38 973
De moins de 20 kg	422 570	384 492	0,28	112 989
De 20 à 60 kg	357 846	353 517	0,28	99 591
De plus de 60 kg	372 464	344 808	0,28	100 418
Total Porcins	1 298 900	1 220 199	0,28	352 674

Non disponibles à l'ISQ, les données sur l'inventaire de la production des volailles ont été collectées via un dépliant produit par le MAPAQ. Moins étoffées que les données de l'ISQ au niveau de la catégorisation des animaux, les données recueillies figurent dans le tableau 37.

**Tableau 37 - Inventaires de volailles pour la MRC Nouvelle-Beauce**

Stocks de volailles 16 mai 2006	Nombre d'oiseaux
Poulets à griller, poulets à rôtir et Cornouailles	1 412 726
Poulettes de moins de 19 semaines, destinées à la ponte	142 212
Poules pondeuses de 19 semaines et plus	452 960
Poules pondeuses destinées à l'approvisionnement de couvoirs	0
Dindons et dindes	18

Source : (MAPAQ, 2007)

Une dernière étape est nécessaire avant d'entrer les données dans le chiffrier MATTEUS. Il faut regrouper et scinder des catégories d'animaux afin de représenter exhaustivement le portrait des déjections. Le tableau 38 montre les regroupements et les scissions de catégorie.



Tableau 38 - Regroupement et scissions de catégories d'animaux

MATTEUS		Calculs
Catégorie d'animaux d'élevage	Nombre en inventaire	Regroupement et scissions de catégorie
Veaux < 205 kg	12 719	Veaux
Bouvillons et génisses	3 680	Génisses pour l'abattage
Génisses laitières	5 688	Génisses de remplacement, type de boucherie
		Bouvillons
		Génisses de remplacement, type laitier
Vaches de boucherie	6 829	Vaches de boucherie
Vaches laitières en gestation	0	Taureaux
Vaches laitières en lactation	14 131	-
		Vaches laitières
<b>TOTAL bovins</b>	<b>43 047</b>	
Porcelets 7 à 20 kg	112 989	De moins de 20 Kg (Porcins)
Porcs d'engraissement > 20 kg	200 009	De 20 à 60 Kg (Porcins)
Truies de remplacement	12 991	De plus de 60 Kg (Porcins)
Truies en gestation	12 991	1/3 Truie
Truies en lactation	12 991	1/3 Truie
Verrats	704	1/3 Truie
		Verrat
<b>TOTAL porcs</b>	<b>352 675</b>	
Jeunes poulettes	142 212	Poulettes de moins de 19 semaines, destinées à la ponte
Poules pondeuses	452 960	Poules pondeuses de 19 semaines et plus
		Poules pondeuses destinées à l'approvisionnement de couvoirs
Poulets à rôtir	1 412 726	Poulets à griller, poulets à rôtir et Cornouailles
Dindes et dindons	18	Dindons et dindes
<b>TOTAL volailles</b>	<b>2 007 916</b>	
Agneaux	316	Agneau (marché)
Brebis	585	Agneau de remplacement
Béliers	18	
<b>TOTAL moutons</b>	<b>919</b>	

### 5.2.2 Les boues

Au niveau de la production des boues, les données utilisées dans le cadre de cette recherche proviennent du PGMR 2003 de la MRC Nouvelle-Beauce. Les boues se divisent en trois catégories : de fosses septiques, d'usines d'épuration et industrielles.

#### 5.2.2.1 Boues de fosses septiques

Dans le PGMR, l'estimation des volumes des boues de fosses septiques (BFS) est présentée sous forme de trois scénarios. Ceux-ci sont basés sur différentes répartitions des installations de fosses septiques entre : 1) les résidences permanentes, 2) les résidences secondaires et 3) les institutionnel, commercial et industriel (ICI). Ainsi : « On y constate que dépendamment des hypothèses retenues pour la répartition des installations, le volume potentiel à gérer pourrait varier entre 7 000 et 9 000 m<sup>3</sup> sur une base annuelle » (PGMR NB, 2003, p. 52).

Sur la base des trois hypothèses disponibles, le choix de la donnée chiffrée a été de prendre la possibilité mitoyenne. C'est l'hypothèse selon la répartition des chalets qui est considérée dans les calculs de la simulation. Ainsi, les BFS sont estimés à 8 617 m<sup>3</sup>/an (PGMR NB, 2003, p. 53).

#### 5.2.2.2 Boues d'usines d'épuration

Concernant ce type de boue, notons que le PGMR de la MRC ne présente pas de données précises. À ce sujet, on peut lire que : « Considérant le caractère ponctuel des activités de vidange des étangs, il est difficile de tracer un portrait précis de la production de ce type de boues sur le territoire » (PGMR NB, 2003, p. 54). Ainsi, la production estimée des boues de station d'épuration des eaux usées est de 0.3 m<sup>3</sup>/jour par 1 000 habitants. Selon les projections démographiques de l'ISQ, présentées au chapitre 1 du PGMR de la Nouvelle-Beauce, la population de 2006 serait de 26 800 habitants (PGMR N-B, p. 6). La combinaison de ces informations permet de calculer un volume de boue équivalent à 11 552 m<sup>3</sup>/an.

Au niveau de la simulation dans MATTEUS, les données des BFS et des boues d'usines d'épuration sont regroupées pour former un volume annuel de 11 552 m<sup>3</sup>/an. Ces données

sont classées sous l'appellation des boues municipales, puisque le poste des BFS est inexistant. Ces deux types de boues possèdent des niveaux de matières sèches similaires, ce qui rend la fusion des deux nombres plausible au niveau du traitement dans le digesteur.

#### 5.2.2.3 Boues industrielles

Le PGMR de la MRC fournit l'information sur deux types de boues industrielles. La première consiste aux boues de l'usine Olymel. Ces boues forment 4 500 tonnes sous forme déshydratée. Le second producteur de boues industrielles est l'usine Saputo. Cette exploitation produit une quantité annuelle d'environ 600 tonnes. Respectivement, ces deux types de boues ont été classés à l'intérieur du chiffrier MATTEUS sous les catégories suivantes : boues d'abattoir de porcs et lactosérum.

#### 5.2.3 Les matières putrescibles

Au niveau de la collecte des matières putrescibles, le PGMR fait mention de l'interdiction prévue en 2005 par le gouvernement québécois d'enfouir les résidus verts. Concrètement, aucun engagement vers la collecte de matières putrescibles (MP) n'est présenté. Dans le cadre de cette étude, il est nécessaire d'évaluer le volume potentiel des MP. Peu de données étant disponibles sur le sujet, puisque relativement peu implantée au Québec, la moyenne élaborée par la Communauté Métropolitaine de Montréal sert aux fins de calcul. Un partenaire de la CMM, SNC-Lavalin, estime que le taux de production moyen de matières résiduelles est de 430 Kg / habitant /an CMM, 2007, p. 219). Tiré du rapport *Comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles* réalisé dans le cadre du PMGMR, le tableau 39 montre la composition des matières résiduelles.

**Tableau 39 - Composition des matières résiduelles**

Type de matière	Composition (%)
Résidus recyclables	39.4
Résidus organiques	38.3
Autres résidus valorisables	6.8
Autres résidus non valorisables	15.5
Résidus ultimes	N/A
Résidus mélangés	N/A
<b>Total</b>	100

Source : (PMGMR, 2007, p.219; SNC-Lavalin et Solinov, 2007)

Selon ces données, le calcul de la quantité de déchets domestiques putrescibles est articulé autour des calculs présentés au tableau 40. Pour les fins de calculs et de modélisation, la composition des matières résiduelles et matières putrescibles est jugée constante. Le tableau 41 montre les références relatives aux facteurs de conversion tels que calculés par Recyc-Québec et les référentiels de calculs adoptés dans le cadre de ce mémoire.

**Tableau 40 - Calculs matières putrescibles MRC Nouvelle-Beauce**

	% Composition (Composition estimée par un consultant)	Kg / hab. / an	% MS (Estimé par le consultant, selon la composition)	Résidus putrescibles Kg / an	Taux de conversion Kg / m <sup>3</sup> (Valeurs réelles et estimées)	Résidus Putrescibles m <sup>3</sup>
Matières résiduelles	1,00	430	0,25	Kg / an	Kg / m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>
• Résidus alimentaires	0,25	108	n.d.	2 881 000	600	4 802
• Résidus verts	0,10	43	n.d.	1 152 400	240	4 802
• Matières inertes	0,05	22	n.d.	576 200	300	1 921
• Autres MR résidentielles	0,60	258	-	-	-	-
Cumulatifs des MP (Alimentaires, verts et matières inertes)	0,40	172	0,25	11 524 000		11 524

**Tableau 41 - Références pour calculs des MP MRC Nouvelle-Beauce**

Taux de conversion Kg / m <sup>3</sup> (Source :Recyc-Québec,2002. p.43)		Référentiel pour fin de calcul	
Types de matières	Kg / m <sup>3</sup>	Calcul	Type de variable
Gazon (humide et compacté)	600	Résidus alimentaires	Estimé (par un consultant)
Gazon (humide et en vrac)	240	Résidus verts	Réelle
Copeaux de bois	300	Matières inertes	Réelle

### 5.3 L'application de la norme phosphore

La modélisation du système nécessite les estimations du surplus de phosphore pour la MRC de la Nouvelle-Beauce. Cette information est partiellement disponible, dans une présentation du MAPAQ. Ainsi, le surplus calculé en fonction du bilan de surface pour 2007 présenté au tableau 42 est de 2 687 161 kg de phosphore.

**Tableau 42 - Estimation des surplus (kg de  $P_2O_5$ )**

	REA	Surface	Agronomique
La Nouvelle-Beauce	873 702	2 687 161	1 890 579

Source : (MAPAQ, 2007)

### 5.4 Calculs des ratios pour la modélisation

La modélisation nécessite l'ajout de ratios calculés à partir de MATTEUS. Les sections suivantes présentent la méthode de calcul utilisée pour ces ratios.

#### 5.4.1 Les déjections animales

Alors que le chiffrier MATTEUS présente 19 catégories pour représenter les élevages ainsi que leurs déjections respectives, le présent modèle ne présente que quatre catégories de productions animales, soit : bovine, porcine, de volaille et ovine. Dans le but d'obtenir un niveau unique de déjection par catégorie d'animaux, le cumul des déjections par catégorie d'animaux a été divisé par l'inventaire total de la catégorie. Cette méthode qui cherche à obtenir une moyenne générale permet de fournir une approximation crédible puisque l'étude des données des dernières années montre que les inventaires sont plutôt constants. Le tableau 43, montre le détail du calcul initial.

**Tableau 43 - Calculs des effluents de déjections**

MATTEUS		Calculs	
Catégorie d'animaux d'élevage	Nombre en inventaire	effluent (m3/h)	effluent (m3/s/u)
Veaux < 205 kg	12 719	4,32446	
Bouvillons et génisses	3 680	3,44466	
Génisses laitières	5 688	7,77597	
Vaches de boucherie	6 829	9,41122	
Vaches laitières en gestation	0	0,00000	
Vaches laitières en lactation	14 131	27,79097	
<b>TOTAL bovins</b>	<b>43 047</b>	<b>52,74728</b>	<b>0,206</b>
Porcelets 7 à 20 kg	112 989	6,78687	
Porcs d'engraissement > 20 kg	200 009	34,81873	
Truies de remplacement	12 991	1,17001	
Truies en gestation	12 991	2,67667	
Truies en lactation	12 991	6,64165	
Verrats	704	0,12297	
<b>TOTAL porcs</b>	<b>352 675</b>	<b>52,21691</b>	<b>0,025</b>
Jeunes poulettes	142 212	0,17563	
Poules pondeuses	452 960	1,80410	
Poulets à rôtir	1 412 726	6,40436	
Dindes et dindons	18	0,00021	
<b>TOTAL volailles</b>	<b>2 007 916</b>	<b>8,38430</b>	<b>0,001</b>
Agneaux	316	0,01196	
Brebis	585	0,06640	
Béliers	18	0,00252	
<b>TOTAL moutons</b>	<b>919</b>	<b>0,08087</b>	<b>0,015</b>

#### 5.4.2 Calcul de ratios

Le tableau 44 montre le calcul du ratio biogaz/digesta. Ce ratio permet de calculer la proportion de chacun des effluents suivant le processus de digestion.

**Tableau 44 - Calcul du facteur biogaz/digesta et facteur d'ajustement**

	MATTEUS	Entrée	Sortie		Total Sortie
		TOTAL Effluent non digéré	Effluent digéré	Biogaz produit	
	Réel	117,51	108,42	6868,40	6976,82
	% sur le Total Sortie (facteur)		0,02	0,98	1,00
	Proportion sur Total effluent non digéré	117,51	1,83	115,69	117,51
Calculs	Facteur correction pour PowerSim		59,37	59,37	

Composé majoritairement d'eau, le digesta doit subir d'abord une clarification puis une déshydratation avant d'être destiné soit au compostage ou à l'élimination. La clarification s'effectue lorsque le digesta se décante. Il est alors possible de retirer une première portion d'eau. Le tableau 45 montre les étapes des calculs pour le facteur de clarification et le facteur correction densité.

Le facteur correction densité est le reflet du changement de densité associé à la clarification. Le flux de sortie du réacteur possède une densité de 0.9626 (t/m<sup>3</sup>), alors que suivant la clarification, les jus et boues ont une densité de 1. Le facteur de clarification calcule le pourcentage d'effluents liquides retirés du digesta post clarification.



**Tableau 45 - Facteur de clarification et Facteur correction densité**

MATTEUS	Effluents - Réacteur		Clarification de l'effluent traité		
	Entrée	Sortie	Entrée	Sortie	
	TOTAL Effluent non digéré	Effluent digéré	TOTAL entrée	Clarification? jus	OUI solides humides
Siccité (tms/t)	0,1233	0,07301	0,0730	0,0208	0,1000
d (t/m3):	0,9626	0,96260	-	1,0000	1,0000
F (t/h)	113,124113	104,37352	<b>104,3735</b>	<b>35,5698</b>	<b>68,8037</b>
MS (t/h)	13,9451	7,61998	7,6200	0,7396	6,8804
eau (t/h)	99,1790	96,75354	96,7535	34,8302	61,9233
Vol (m3/h)	117,519527	<b>108,43</b>		35,5698	68,8037
Calculs	d (t/m3):	0,96260		1,0000	1,0000
	Facteur de corr. densité	-	0,037	-	-
	Vol (m3/h)	-	<b>104,3735</b>	<b>35,5698</b>	<b>68,8037</b>
	Facteur de clarification		100	34	66

Suivant la clarification, il est nécessaire d'effectuer une déshydratation mécanique afin de retirer plus d'eau. Le type de matériel retenu pour la déshydratation est un presse-vis. Il s'agit d'un choix économique. Le tableau 46 montre les calculs relatifs au facteur de déshydratation. Notons que le calcul contient un facteur de correction uniformisé, qui provient des variations découlant de l'arrondissement de certaines données.

**Tableau 46 - Calcul du facteur de déshydratation**

MATTEUS	Entrée				Sortie		Total Sortie
	Boues (digesta)	Qté de mat structurant	Flocculants	Matières à déshydrater	Jus	Boues	Cumul
Vol (m3/h)	68,94	0,0000		68,94	48,77	25,60	74,37
Calculs	% sur le total de sortie				66%	34%	100%
	Proportion sur les matières à déshydrater				68,94	45,21	23,73
	Facteur de correction (déshydratation)				1,08	1,08	

La dernière étape du compostage nécessite l'ajout de matières structurantes. Dans le cas présent, il s'agit de tourbe, une matière qui offre un bon ratio qualité/prix. Le tableau 47 montre les calculs du facteur matières structurantes et du facteur compostage.

**Tableau 47 - Facteur matières structurantes et facteur compostage**

	Entrée					Sortie
	Boues	Garnissages usés	Total entrée	Qté de mat. structurantes	Matières à composter sur site	Compost sur site
<b>MATTEUS</b>						
Vol (m3/h)	25,58	1,63	27,21	24,78	51,99	39,21
	Entrée					Sortie
	Boues	Garnissages usés	Total entrée	Qté de mat structurant + Garnissages	Matières à composter sur site	Compost sur site
<b>Calculs</b>						
	25,58	0,00	25,58	26,41	51,99	39,21
Facteur matières structurantes			100%	103%		
Facteur compostage					100%	75%

Un dernier facteur s'ajoute au processus de digestion anaérobie. Il s'agit du facteur de conversion  $t/m^3$ . Selon des données présentées dans MATTEUS, il s'agit d'un facteur de  $0.50 t/m^3$ .

Suivant la digestion anaérobie, le biogaz produit peut être brûlé ou valorisé dans de multiples applications. Le biogaz, comme le gaz naturel, est un gaz qui doit être utilisé en continu puisque non compressible. Étant donné que le Biogaz est corrosif, il peut être utilisé tel quel ou bien subir une purification qui le rendra non corrosif. L'utilisation du biogaz tel quel peut se faire sous diverses formes. Le tableau 48 montre des exemples.

**Tableau 48 - Exemples d'utilisation du biogaz**

	Type d'utilisation		
	Applications thermiques	Autres applications	
Proportion de biogaz dans le combustible	100 %	10 %	100 %
Adaptation des systèmes contre la corrosion	Non	Non	Oui

La purification du biogaz est une étape durant laquelle un biofiltre est utilisé pour retirer les éléments corrosifs présents dans le gaz. Le tableau 49 montre le calcul du facteur de perte lié à la purification. Suivant cette étape, le gaz peut être utilisé comme tous les autres gaz combustibles, et ce, sans modification des équipements.

**Tableau 49 - Calcul du facteur perte purification**

		Entrée	Sortie	
		TOTAL	Biogaz purifié	Pertes (estimées)
		Biogaz non purifié		
<b>MATTEUS</b>	Réel	6869,2	6333,7	535,5
Calculs	% sur le Total Sortie (facteur)	1,00	0,92	0,08

Dans l'objectif de mesurer la valeur du gaz traité, il s'agit d'opérer une conversion d'unités. Le prix du gaz est établi en gigajoules en fonction du pouvoir calorifique du gaz. Alors que le système produit des m<sup>3</sup>, il est possible de transformer les unités m<sup>3</sup> en GJ, voir le tableau 50. Au niveau du biogaz, le même ratio est utilisé, or le prix de celui-ci tient compte de son pouvoir calorifique inférieur.

**Tableau 50 - Calcul facteur conversion J GJ**

	Joules	Mégajoules	Gigajoules
	1 000 000 J	1 MJ	0.001 GJ
Gaz Naturel	-	39 MJ / m <sup>3</sup> Source : (Wikipwdia.org, 2008)	-
Facteur J GJ	-		0.039 GJ / m <sup>3</sup>

Au niveau de la production d'électricité, deux facteurs sont nécessaires. Le premier, le facteur m<sup>3</sup> kWe, sert à transposer les m<sup>3</sup> en kWe. Le second facteur, Facteur kWe D I, permet de refléter l'utilisation d'énergie du système. Ainsi le Facteur kWe D I représente l'électricité disponible versus installée. Ces facteurs sont calculés au tableau 51.

**Tableau 51 - Facteur kWe / kWh et Facteur kWe d/i**

MATTEUS		Calculs	
Gaz traité (m3/h)	6 334		
Puissance électrique installée (kWe)	13 339		
		2,11	Facteur m <sup>3</sup> kWe
Puissance électrique disponible (kWe)	11 340		
		0,85	Facteur kWe d/i (disponible / installée)
Électricité nette (kWh-e/an)	94 370 782		
		8322	Facteur kWe / kWh (calculé)
		8760	Facteur KWe / kWh (théorique)*

### 5.5 Calculs modules économiques

Pour établir les coûts municipaux évités, il faut cibler seulement les matières actuellement gérées par la ville. Ces matières sont : les matières putrescibles équivalentes à 11 524 m<sup>3</sup>/an (présenté au tableau 40), et les boues d'usines d'épuration d'un volume de 1 761 m<sup>3</sup>/an (présenté au tableau 52). Les coûts évités reliés à la gestion des boues d'usines d'épuration ne sont pas comptabilisés dans le modèle; c'est principalement à cause du manque de disponibilité des données sur les coûts de disposition et des faibles volumes générés. Il est également difficile de cibler les boues d'usines d'épuration spécifiquement dans le modèle.

**Tableau 52 - Données sur les boues**

MRC Nouvelle-Beauce	Population hab.	Boues station épuration m <sup>3</sup> / jour 1000 hab. (PGMR Nouvelle-Beauce)	t.m./semaine (PGMR Nouvelle-Beauce)	% MS	Boues m <sup>3</sup> /an (PGMR Nouvelle-Beauce)
Boues de fosses septiques				0,03	8 617
Boues agroalimentaires (1 et 2)					5 150
1-Usine d'abattage Olymel			87,5	0,23	4 550
2-Usine Saputo			12	0,11	600
Boues usines d'épuration	26 800	0,3		0,035	1 761

Au niveau des coûts de ces matières, le tableau 53 montre des données inspirées du PGMR Nouvelle-Beauce pour le calcul. Les données exactes sur les coûts d'élimination n'étant pas disponibles, ceux-ci représenteraient 59 % du coût total de la gestion des matières résiduelles (PGMR, 2003, p. 42). Des données portant sur la tarification de gestion des ordures ont été combinées aux informations sur les types d'habitation provenant du Tableau d'Estimation du volume des BFS à gérer selon trois scénarios de répartition des installations. Le scénario de répartition selon les chalets a été retenu pour ce calcul, ainsi que pour le calcul des volumes des boues.

**Tableau 53 - Calculs coûts municipaux évités**

Municipalité	Type Habitation Porte Chalet	Nombre Habitation	Coûts unitaire Collecte Transport Disposition	Coûts unitaire Disposition (\$)	Coûts Disposition (\$)
Frampton	P	228	101	53,80	12267,02
	C	151	55	32,45	4899,95
St-Anges	P	180	100	59,00	10620,00
	C	82	50	29,50	2419,00
St-Bernard	P	338	130	76,70	25924,60
	C	90	65	38,35	3451,50
St-Elzéar	P	205	115	67,85	13909,25
	C	73	115	67,85	4953,05
Ste-Hénédine	P	165	170	100,30	16549,50
	C	10	170	100,30	1003,00
St-Isidore	P	564	138	81,42	45920,88
	C	97	69	40,71	3948,87
Ste-Marguerite	P	181	60	35,40	6407,40
	C	93	60	35,40	3292,20
Ste-Marie	P	611	157	92,63	56596,93
	C	102	157	92,63	9448,26
Scott	P	311	125	73,75	22936,25
	C	81	125	73,75	5973,75
Vallée-Jonction	P	86	130	76,70	6596,20
	C	49	130	76,70	3758,30
Coût Total	\$	3697			260875,91
Coût moyen	\$				70,56

En combinant les informations sur les coûts de disposition de 260 876 \$ pour les 11 524 m<sup>3</sup>/an on obtient un coût de disposition de 22.64 \$/m<sup>3</sup>. Ceci représente la donnée Coûts disposition utilisée dans le modèle.

Au niveau de la gestion des déjections de porcs, il appert dans le calcul des coûts évités de tenir compte des frais de transports et d'épandages évités pour les déjections qui sont valorisées dans le système.

Le site choisi pour l'implantation d'un centre de digestion anaérobie est situé à Saint-Patrice. Il s'agit de l'ancien site de compostage de Agrior-Ferti Val. Ce site a cessé ses opérations aux environs de 2006. Comme des opérations de nature connexes ont eu lieu sur ce territoire, l'acceptation de ce type d'installation semble plus simple.

Les ententes d'épandages nécessitent parfois le transport de déjections sur une distance allant jusqu'à 80 km. Le scénario veut identifier le kilométrage, ainsi que les surfaces d'épandages nécessaires pour la gestion des surplus de lisiers. Selon Choinière (2003), une base d'épandage moyenne se situe entre 18.5 et 19.0 m<sup>3</sup> / hectare en moyenne. C'est sur cette moyenne d'épandage, 18.75 m<sup>3</sup>/ hectare, que les calculs du scénario porteront.

Le tableau 54 montre les coûts de transport et d'épandage tels que présentés à l'Expo Congrès du porc du Québec en 2003.

**Tableau 54 - Tableau d'épandage en propriété et par ententes**

Propriété	Ententes	Hypothèse de transport (Distance)	Coûts transport	Coûts d'épandage	Coûts/m <sup>3</sup>
X		< 2 Km	0.00 \$	2.50 \$	2.50 \$
	X	= 20 Km	4.50 \$	2.50 \$	7.00 \$
	X	= 50 Km	7.00 \$	2.50 \$	9.50 \$
	X	= 80 Km	9.00 \$	2.50 \$	11.50 \$

Source : (Choinière, 2003, p. 4)

## 5.6 Équipements et valeurs non modélisés

La modélisation, telle que présentée à l'annexe 4, met en évidence divers facteurs dont les flux, les valeurs marchandes des extrants et la dynamique des coûts reliés aux investissements relatifs aux équipements. Dans le cadre de cette recherche, seuls les principaux équipements ont été modélisés afin de conserver un niveau d'agrégation adéquat. Le modèle comprend les équipements dont les investissements sont majeurs. C'est le cas des unités de digestion anaérobie et des génératrices nécessaires à la production d'électricité. Le tableau 55 montre cinq équipements qui n'ont pas été modélisés étant donné que les coûts relatifs sont faibles comparativement au reste du modèle. Dans le cas des piles stat aérées, l'hypothèse suivante a été formulée. Ces équipements sont probablement déjà présents sur les lieux de l'ancien site de compostage de Agrior-Ferti Val.

**Tableau 55 - Autres équipements**

Équipements	Usage	Prix unitaire	Capacité de référence	Vie utile (ans)	Investissement Maximal (100 % MR valorisées)
Disques rotatifs	Déchiquetage des MR	31 129 \$	0,3 tmh/h	15	1 095 621 \$
Presse-vis	Déshydratation mécanique	739 800 \$	2500 tms/h	15	1 716 202 \$
Piles stat aérées	Compostage	700 000 \$	2,10 tmh/h	15	3 554 289 \$
Torchère type bougie	Brûler les gaz	37 800 \$	250 Nm <sup>3</sup> /h	15	580 980 \$
Biofiltre	Purification du gaz	91 100 \$	765 Nm <sup>3</sup> /h	15	219 389 \$

Au niveau des coûts d'opération, seule la puissance électrique nécessaire aux équipements a été modélisée. L'ajout d'un facteur d'électricité disponible versus installé tient compte de cette réalité d'utilisation des kWh produits. Le tableau 56 montre les coûts annuels d'un système complet tel que modélisé.



**Tableau 56 - Coûts d'opération absents du modèle**

MATTEUS	
Opération - sans l'électricité (\$/an)	(\$/an)
Déchiqueteur	1 757
Digester anaérobie	789 161
Déshydratation	2 345 815
Épandage/Coût traitement eau	2 201 793
Compostage des boues	2 755 132
Enfouissement	0
Torchère	30 698
Purification du biogaz	35 421
Génératrice	1 240 658
Chaudière	0
<b>TOTAL</b>	<b>9 400 435</b>

Le système fonctionne en cogénération, c'est-à-dire, il y a récupération de chaleur qui dans un premier temps, chauffe les installations et qui, dans un deuxième temps, exploite la vente des surplus. Ces surplus peuvent servir à chauffer des installations adjacentes comme une aréna municipale ou une serre. La chaleur dégagée par les digesteurs et les génératrices n'est pas modélisée dans le système. La tableau 57 montre la valeur de cet extrant absent du modèle, soit la chaleur nette.

**Tableau 57 - Valeur des produits**

MATTEUS		
<u>Produits</u>	<u>Valeur</u>	<u>Unité</u>
Tarif électricité	0,067	\$/kWh
Tarif chaleur	19,00	\$/GJ
Valeur compost	30,00	\$/tmh
Coût actuel de disposition de l'effluent	20,00	\$/tmh
Crédits (\$/an)		
Électricité nette	6 323 772	\$/an
Chaleur nette	3 782 978	\$/an
Compost	5 165 679	\$/an
<b>TOTAL</b>	<b>15 272 430</b>	<b>\$/an</b>

Les programmes de subvention du Programme Prime-Vert ainsi que le crédit d'impôt provincial allant tout deux jusqu'à un maximum de 200 000\$, n'ont pas été modélisés.

En somme, c'est environ 10 million de dollars qui n'ont pas été modélisés. Considérant que les facteurs de mise à l'échelle dans MATTEUS sont conservateurs, ainsi, les coûts d'équipements devraient être inférieurs à ceux présentés (Laflamme, 2008). Au niveau des coûts d'opérations, ils devraient être eux aussi réduits par des économies d'échelles et de la main d'œuvre plus qualifiée pour ce type d'exploitation à grande échelle comparativement aux unités de digestions à la ferme ou l'agriculteur s'occupe lui-même de l'entretien des équipements.

Au niveau des subventions, il est réaliste de concevoir que le gouvernement offre une subvention à la hauteur du système proposé. Le fond municipal vert octroie un financement à un taux d'intérêt réduit jusqu'à concurrence de 4 millions de dollars et des subventions allant jusqu'à 400 000 \$ pour la réalisation de projets. Au niveau des études de faisabilité et d'essais terrain, le financement de l'ordre de 50 % peut atteindre les 350 000 \$. Ce programme est axé pour les solutions de valorisation regroupées telles que celles des villes et MRC.

Les deux autres initiatives présentées ont été lancées pour des projets de petites envergures tels que des installations de digestion à la ferme. Notons que dans le cas de la subvention Prime-Vert, c'est 20 % des équipements de traitement des lisiers qui peuvent bénéficier de la subvention et que le crédit d'impôt couvre 30 % de ces mêmes équipements en valeur de crédit.

## 5.7 Synthèse

Ce chapitre a présenté en six sous-sections l'ensemble des données nécessaires à l'établissement des données initiales entrées dans MATTEUS. Suite à l'entrée de ces données sur les effluents initiaux, les calculs portant sur les ratios ont débuté. Nécessaire au processus de modélisation, cette étape permet au modèle N-T d'agir en accord avec les données provenant de MATTEUS.

## CHAPITRE VI

### RÉSULTATS DE LA RECHERCHE

#### 6.1 Introduction

Cette étude avait pour objectif d'évaluer la potentialité de l'implantation d'un site de digestion anaérobie pour le MRC de la Nouvelle-Beauce. Dans l'introduction, la complexité du problème a été soulignée de même que l'absence d'une vision systémique partagée par les acteurs. Afin de répondre aux questions des recherches énoncées dans l'introduction, les principes de la dynamique des systèmes ont été appliqués. L'apport de la dynamique des systèmes est significative dans le cadre du contexte de recherche. En effet, les principes qualitatifs et quantitatifs contribuent à la création d'une vision systémique entre les acteurs.

Notons que les acteurs : les producteurs, la municipalité et les citoyens, évoluent dans un univers de cohabitation fragile. Des tensions historiques sont observables entre ces trois catégories d'acteurs. Leurs préoccupations respectives peuvent entrer en conflit. La présente recherche n'est pas axée sur la gestion du changement et des problématiques de cohabitations régionales. Par contre, notons à ce sujet que les résultats de l'Enquête concernant les perceptions de la population de la région Chaudière-Appalaches sur le positionnement de l'agriculture et de l'agroalimentaire dans la région (MAPAQ, 2006) montre des résultats intéressants au niveau de la cohabitation régionale. L'étude des résultats montre que la cohabitation régionale entre les agriculteurs et la populations en général est bonne; ce qui n'est pas nécessairement le cas dans d'autres régions du Québec.

Parmi les faits saillants présentés dans l'étude, la section vision générale du secteur montre que 90 % des personnes interrogées considèrent que les relations entre les agriculteurs et le reste de la population sont bonnes et que globalement, la moitié de la population estime qu'il y a des inconvénients à vivre près d'une ferme (mauvaises odeurs) mais également des avantages (être à proximité de produits frais) (MAPAQ, 2006, p.13).

La section intitulée à propos de l'environnement du même sondage indique que près de 8 répondants sur 10 estiment que les producteurs de la région pratiquent une agriculture respectueuse de l'environnement (MAPAQ, 2006, p.14).

Le sondage révèle dans la section qui étudie l'impact économique révèle que 75 % des personnes interrogées reconnaissent que l'activité agricole contribue au développement social des différentes localités de Chaudière-Appalaches et la même proportion des gens reconnaissent l'impact de l'agriculture sur le maintien des services dans certaines localités (MAPAQ, 2006, p.15).

Cette enquête montre que la cohabitation régionale dans la région Chaudière-Appalaches est bonne et que les citoyens sont conscients de l'importance des exploitations agricoles dans le développement de leur région ainsi qu'au niveau de l'essor économique. Notons que 89 % des répondants ne travaillent ni dans le secteur agricole, ni dans l'industrie agroalimentaire. En contrepartie, 52 % des personnes sondées connaissent dans leur entourage des personnes qui travaillent dans les secteurs agricole ou agroalimentaire (MAPAQ, 2006, p.10).

## 6.2 Présentation des résultats

La présente étude propose la comparaison de divers scénarios. Afin de faciliter la comparaison des différents scénarios, les résultats de chacune des modélisations sont présentés sous une forme unique, laquelle repose sur un tableau synthèse et sur cinq sections de graphiques. Les sous-sections 6.2.1 à 6.2.5 présentent les éléments de présentation des résultats. La section 6.3 montre les résultats obtenus suivant les différentes rondes de simulation, soit le scénario A et B.

### 6.2.1 Tableau des résultats

Le premier tableau intitulé *Résultats : (Nom du scénario)* montre diverses données regroupées en quatre sous-sections. La section *intrants* montre les niveaux de chacun des intrants valorisés dans le système pour une période (x). La section *extrants* montre les mêmes données sauf qu'il s'agit des niveaux d'extrants. La section *matériaux* présente la capacité ainsi que le nombre d'installations de digestion ou de génération d'électricité. Ces données représentent le niveau observé à la période (x). La dernière section, intitulée *économique* présente les quantités cumulées en dollars liés aux coûts d'investissement et de revenus, lesquels forment à l'intérieur de la même section *économique* le *Bilan 1*. Les coûts évités combinés au *Bilan 1* forment le *Bilan 2 à la toute fin de cette section*. Ce second bilan, montre la rentabilité en fonction de non seulement de la dynamique de coûts, mais aussi des coûts évités compte tenu de la valorisation de certains des intrants.

### 6.2.2 Figure d'ajustement de la capacité

La figure *Ajustement de capacité* représente la dynamique d'ajustement de la capacité pour les digesteurs et les génératrices. Sur les graphiques, chaque plateau de la courbe représente l'installation d'une nouvelle unité, soit l'ajout de capacité dans le modèle. Lorsque la courbe atteint un plateau, c'est que la capacité a atteint le niveau souhaité en fonction des volumes traités. C'est que le modèle atteint l'équilibre.

### 6.2.3 Figures des valeurs Compost et kWh et Valeur biogaz et Gaz naturel

Les figures intitulées *Valeur Compost et kWh* et *Valeur Biogaz et Gaz naturel* montrent les niveaux de production cumulés (à chaque période) de chacun des quatre intrants. Ces figures sont présentées sur deux pages distinctes.

### 6.2.4 Figure des flux financiers

La figure relative aux *Flux financiers* illustre la progression de trois variables extraites de la sous-section économique du tableau des résultats. La figure reprend graphiquement les informations économiques des coûts d'équipement, revenus et coûts évités.

### 6.2.5 Figure du bilan 2

Finalement la figure *Bilan 2* montre le cumul des coûts évités combinés aux recettes et déboursés liées au *Bilan 1*. Cette figure constitue le dernier élément de présentation des résultats liés à cette étude.

## 6.3 Scénarios

Dans le cadre de cette étude, deux scénarios ont été présentés à la section 5.4. Ces scénarios permettent de répondre aux questions de recherche. Cette section montre les résultats obtenus lors des rondes de simulation du modèle représentant chacun des scénarios retenus.

Afin de situer le lecteur, les résultats d'une simulation de référence sont annexés aux résultats de scénario pour fin de comparaison. La section 6.3.1 présente le scénario employé dans la situation de référence intitulée maintien du statu quo (MSQ). Ces résultats sont présentés conjointement sur l'ensemble des figures et tableaux de la présentation de résultats relatifs aux scénarios A et B. Les sections 6.3.2 et 6.3.3 montrent respectivement les scénarios du projet pilote (scénario A) et celui de l'électricité (scénario B).

### 6.3.1 Calibrage de référence : maintien du statu quo (MSQ)

La première simulation présente un modèle de référence nommé maintien du statu quo (MSQ). Cette simulation sert de référence sur l'ensemble des graphiques et tableaux de présentation des résultats pour chacun des scénarios.

La simulation MSQ représente une étude de cas dont les gaz libérés lors de la digestion sont valorisés en trois extrants différents selon un prorata de 33 %. Ainsi, le tiers des gaz reste sous forme de biogaz, le second tiers sert à la fabrication de méthane et le dernier tiers sert à la production d'électricité. Cette simulation a pour but d'évaluer la rentabilité de chacun des extrants. Notons que 100 % des intrants y sont valorisés

## 6.4 Présentation des résultats

Les sections suivantes montrent les résultats pour chacun des scénarios modélisés. Les résultats sont d'abord présentés puis illustrés à l'aide des figures et du tableau discutés aux sections 6.2.1 à 6.2.5. La présentation des résultats du modèle de référence MSQ est incluse dans les sections 6.4.1. et 6.4.2 soit les scénarios : Projet pilote et Électricité.

### 6.4.1 Résultats - MSQ

L'objectif de la présentation de la situation MSQ est de comparer les niveaux de rentabilité des différents extrants. La section extrants du tableau des résultats montre en dollars (\$) à différentes périodes les revenus provenant des divers extrants. Après 9,5 ans, on observe que la production de biogaz génère des revenus de 106 milles dollars. La transformation du gaz en méthane engendre des revenus de 158 milles dollars et la production d'électricité, un montant de 43 milles dollars. On constate que c'est la production d'électricité qui génère le plus bas niveau de retour sur les investissements.



#### 6.4.2 Résultats - Scénario Projet pilote

Le scénario de référence a deux objectifs. Le premier est de simuler les déboursés relatifs à la tenue d'un projet pilote et le second est de déterminer le niveau de rentabilité lié à la valorisation des gaz post digestion. Lors de la présentation du modèle niveaux-taux, trois types de valorisation commerciale étaient modélisés, soit le biogaz, le gaz naturel et la production d'électricité. Par ce scénario, il est possible d'examiner les revenus d'exploitation et de comparer les avenues de production.

Ce scénario équivaut à un projet pilote. La mise en place de la collecte des matières putrescibles nécessite dans la plupart des cas, la tenue d'un projet pilote sur une portion restreinte de territoire. La MRC de la Nouvelle-Beauce compte 11 municipalités. Dans le cadre du lancement de cette collecte, le projet pilote concerne 20 % de la population soit : 50 % de la population de la ville la plus densément peuplée. Pour cette simulation, la ressource gaz est également allouée aux trois utilisations théoriques du gaz.

La tableau 58 démontre que le système dans son ensemble est de taille réduite comparativement au scénario MSQ. En effet, les équipements nécessaires, digesteurs et génératrice, ne se comptent que par un ou deux comparativement à la situation MSQ ou les unités de digestion atteignent le nombre de sept. Ce scénario a été choisi afin de visualiser tant les rendements que les liquidités nécessaires à la tenue d'un projet pilote. Des investissements de 10 millions de dollars sont plus « facilement » finançables que ceux qui dépassent les 26 millions de dollars.

### Scénario A : Projet pilote

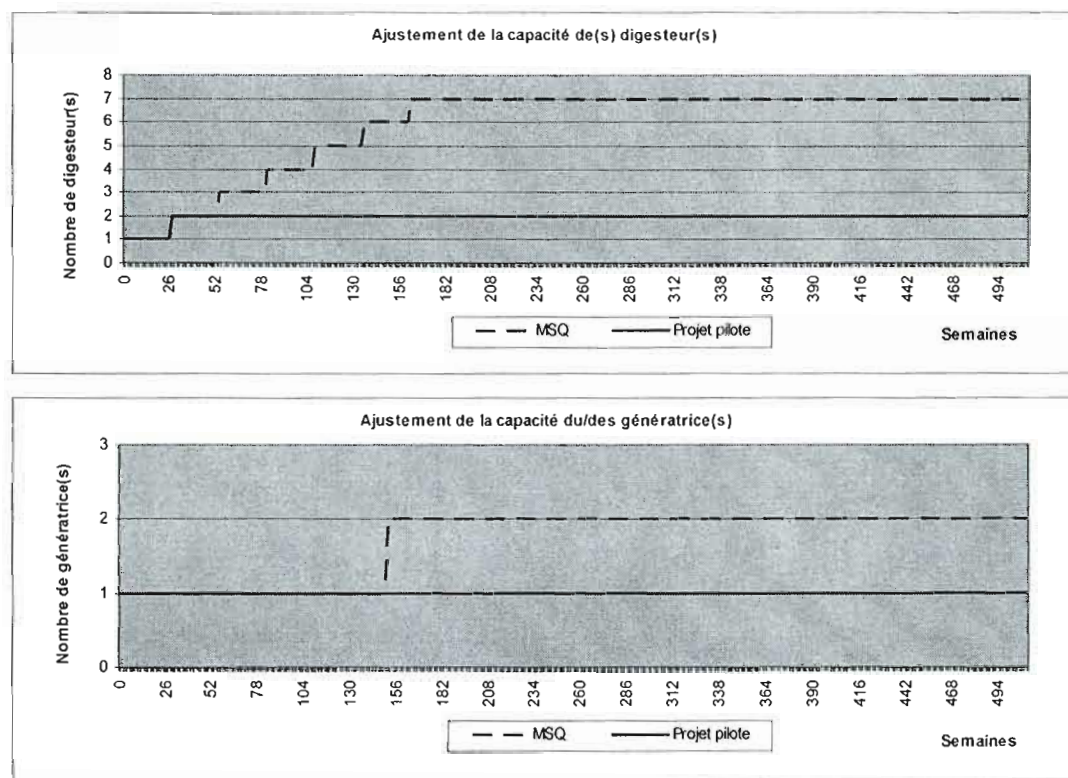
Le côté droit du tableau 58 montre les résultats du scénario intitulé projet pilote. On remarque que les intrants du système sont réduits par rapport à situation MSQ. Ce scénario permet d'évaluer les coûts relatifs à la tenue de l'essai. On remarque que le bilan 1 atteint le point mort après la deuxième année. La simulation N-T, permet de cibler exactement ce seuil. Celui-ci est à la 131<sup>e</sup> période. En fonction des 20 % des intrants disponibles, le système compte un maximum de deux digesteurs et d'une génératrice électrique.

Tableau 58 - Résultats : Scénario A

Années		Calibrage					Scénario				
		MSQ					Projet pilote				
		0	2	4	6	9,5	0	2	4	6	9,5
Intrants	Déjections m3	19 648	19 648	19 668	19 668	19 677	3 883	3 883	3 903	3 903	3 912
	Boues m3	19 706	19 706	19 706	19 706	19 706	3 941	3 941	3 941	3 941	3 941
	MP m3	1 347	5 749	6 265	6 266	6 266	924	1 256	1 255	1 256	1 256
Extrants	Compost \$/p	0	66 834	96 761	96 853	96 900	0	19 133	19 133	19 226	19 272
	Biogaz \$/p	18 400	73 419	106 396	106 396	106 447	18 301	21 018	21 120	21 120	21 171
	Gaz naturel \$/p	0	109 201	158 249	158 249	158 324	0	31 262	31 413	31 413	31 489
	kWh \$/p	0	29 749	43 111	43 111	43 132	0	8 517	8 558	8 558	8 578
Matériels	Digester(s) u.	1	4	7	7	7	1	2	2	2	2
	Vol. D m3	3 500	14 000	24 500	24 500	24 500	3 500	7 000	7 000	7 000	7 000
	Génératrice(s) u	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1
	Vol G kWe	5 000	5 000	10 000	10 000	10 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Économique	Coûts										
	Équipements \$	0	14 457 222	26 674 548	26 674 548	26 674 548	0	9 977 430	9 977 430	9 977 430	9 977 430
	Revenus \$	0	17 004 300	56 656 762	98 735 905	173 200 186	0	7 867 845	16 180 819	24 533 604	39 328 175
	Bilan 1 \$	0	2 547 078	29 982 214	72 061 357	146 525 638	0	(2 109 585)	6 203 389	14 556 174	29 350 745
	Coûts évités \$	0	9 399 816	30 457 106	52 585 801	91 745 390	0	4 225 514	8 597 405	12 989 782	20 769 732
	Bilan 2 \$	0	11 946 894	60 439 320	124 647 158	238 271 028	0	2 115 929	14 800 794	27 545 957	50 120 478

La figure 50 montre deux graphiques d'ajustement de la capacité des équipements modélisés. L'ajout d'un nouvel équipement se traduit par l'apparition d'un plateau dans la courbe. Ainsi, la situation MSQ montre l'achat successif de six digesteurs. La largeur du plateau, dans ce cas ci, de 26 semaines, dépend du temps de mise en opération de la capacité ajoutée et de l'état de sous capacité du digesteur lors du lancement de la simulation. Au niveau de la génératrice, l'utilisation sous optimale du système à son départ combiné à sa grande capacité explique un plateau plus large. La situation MSQ nécessite plus d'équipement puisqu'elle modélise 100 % des MR du système étudié.

**Figure 50 - Scénario A : Ajustement de capacité**



Les figures 51 et 52 présentent quatre graphiques de valeur qui montrent les niveaux par période des valeurs de chacun des extrants. Les données présentées ne sont donc pas des valeurs cumulées. Si tel était le cas, la courbe ressemblerait plutôt à une courbe exponentielle. Les données cumulées de revenus sont présentées au tableau des résultats. Les plateaux visibles sont directement liés à ajout de capacité des systèmes de traitement.

**Figure 51 - Scénario A : Valeur Compost et kWh**

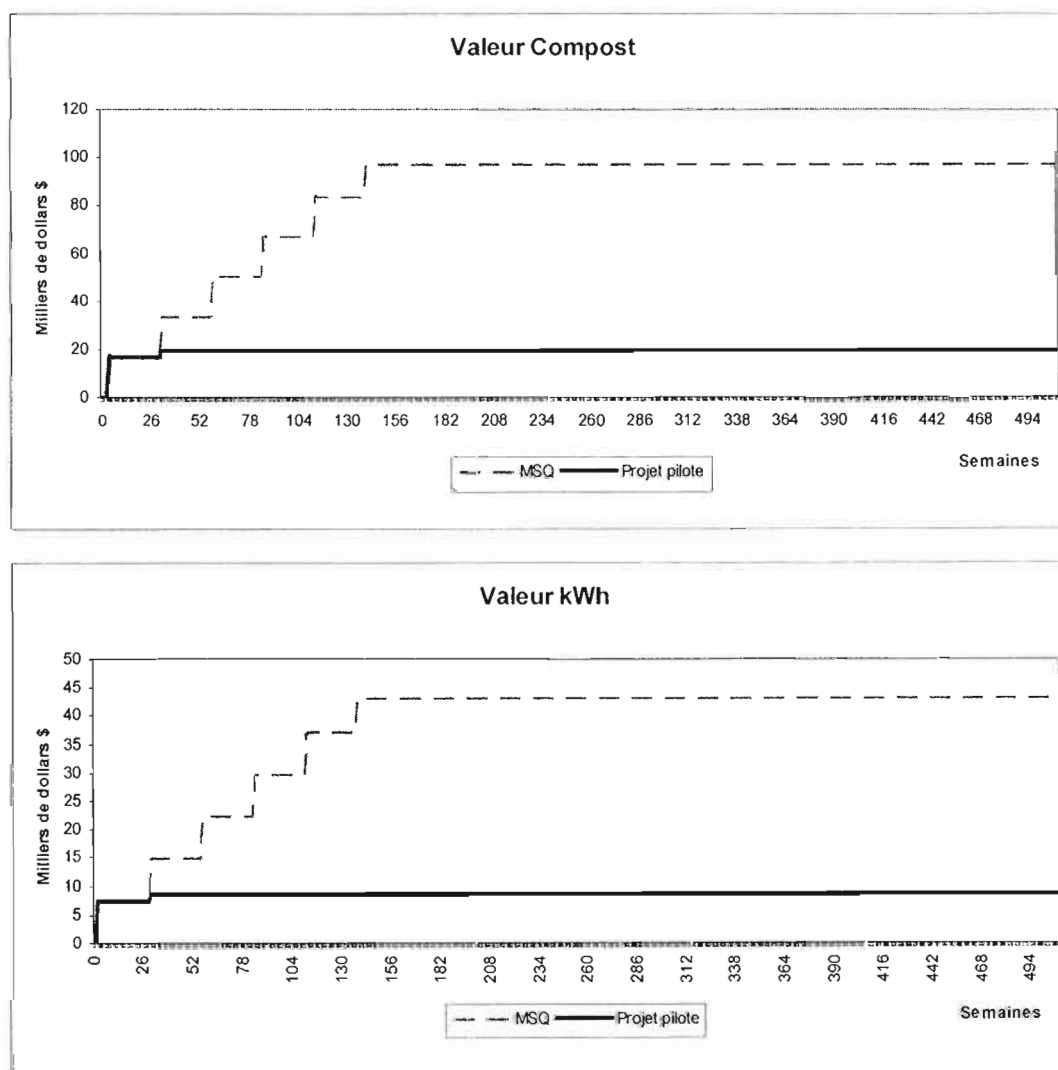
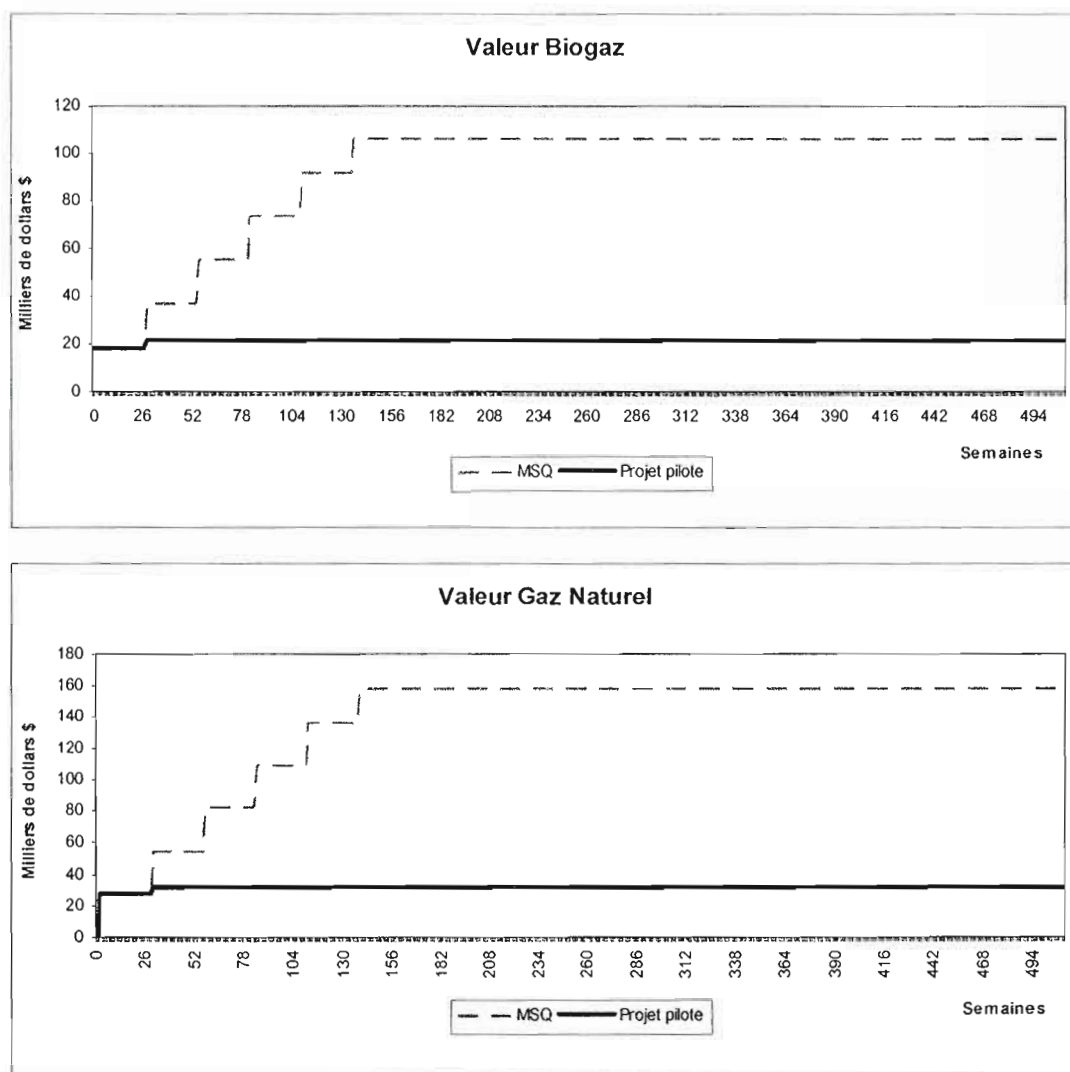
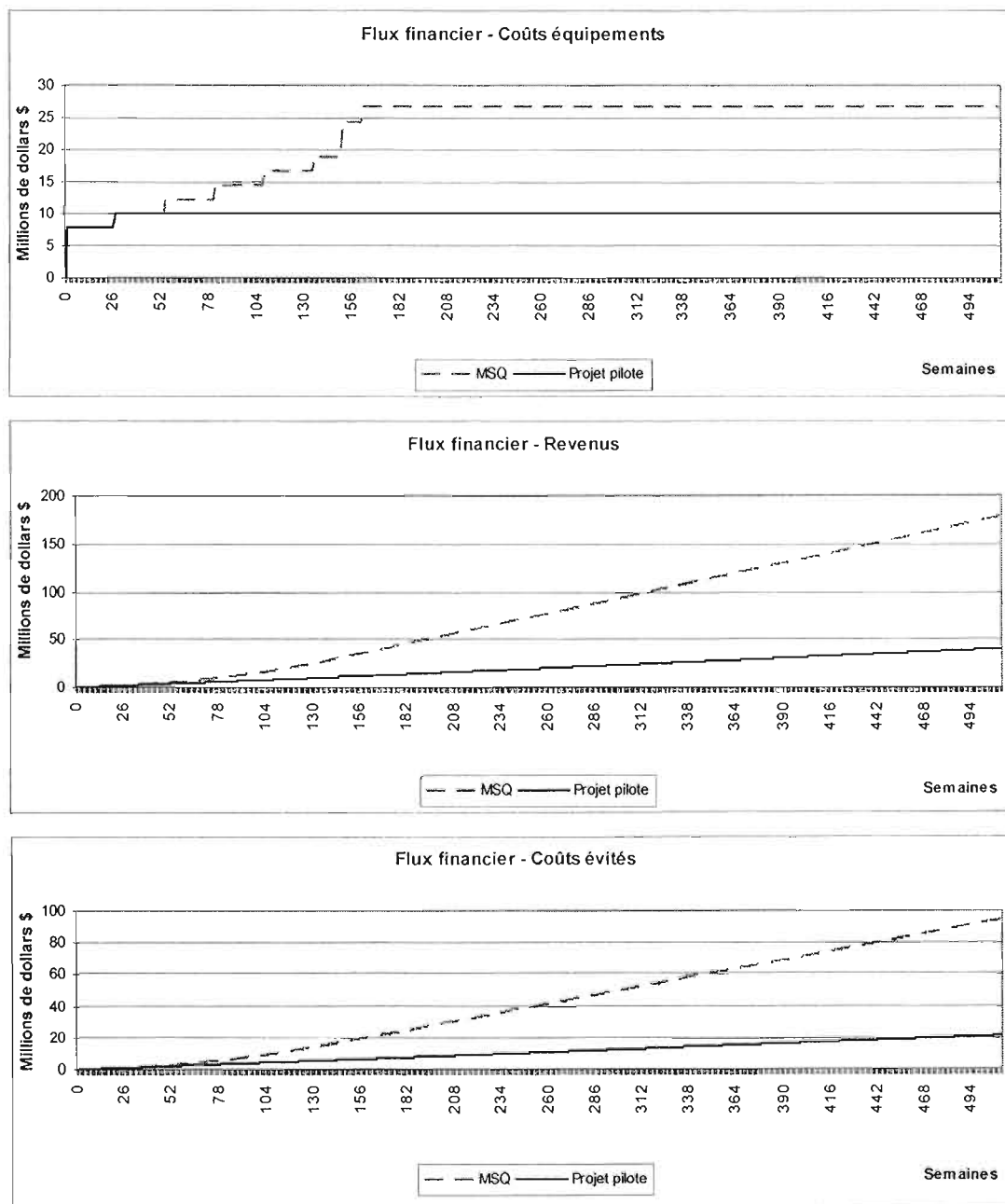


Figure 52 - Scénario A : Biogaz et Gaz naturel



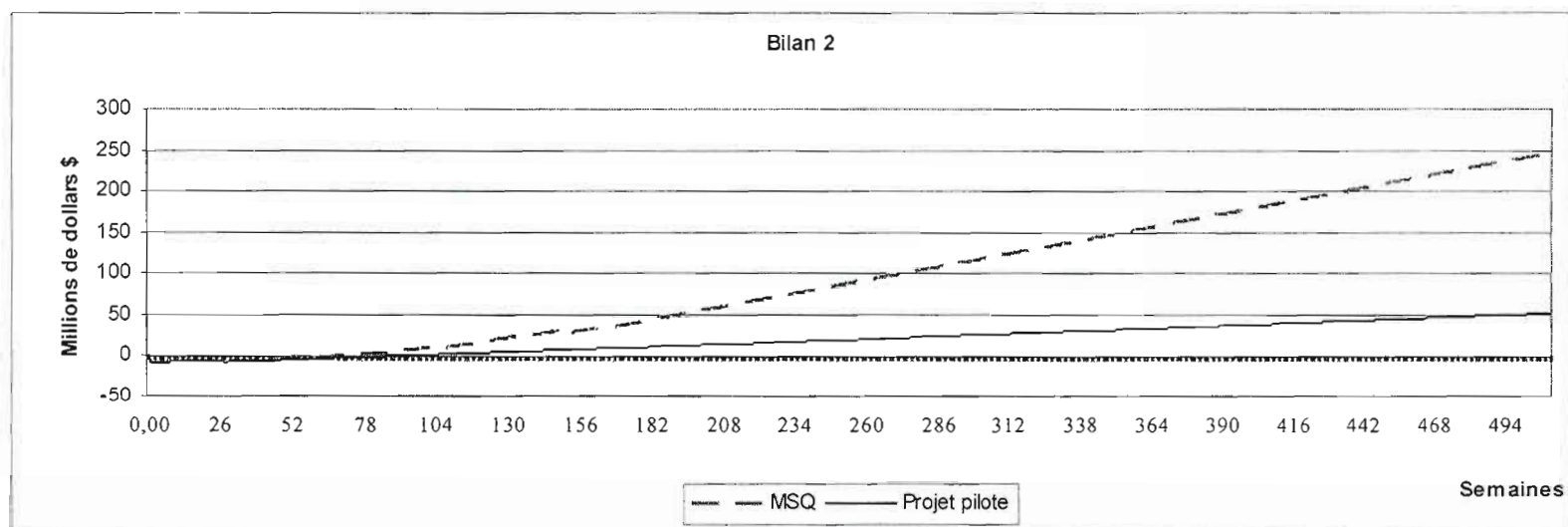
La figure 53 montre trois graphiques liés aux flux financiers. Ces résultats cumulés permettent d'observer la tendance générale des flux financiers. On remarque que les coûts d'équipement présentent une nouvelle allure. Celle-ci provient de l'adéquation des deux ajustements de capacité sur les deux types d'équipement de traitement.

**Figure 53 - Scénario A : Flux financiers**



La figure 54 présente le bilan 2. Ce bilan inclut les coûts, les revenus ainsi que les coûts évités suite à la valorisation des MR. On constate que le seuil de rentabilité peut être atteint à environ un an et demi. Notons que le bilan 1 qui n'inclut pas les coûts évités atteint ce niveau à la 131<sup>e</sup> période, soit après deux ans et demi.

**Figure 54 - Scénario A : Bilan 2**



#### 6.4.3 Résultats - Scénario Électricité

Le scénario électricité montre les revenus et les liquidités nécessaires lorsque le système fonctionne à son plein potentiel. Ceci est particulièrement intéressant, car il permet de voir à l'œuvre les modules d'ajustement de la capacité du digesteur et de la génératrice.

Contrairement à la simulation MSQ, dans le scénario B seule la valorisation du gaz par la production de l'électricité est retenue. Bien que fort profitable, la vente de gaz naturel sous forme de méthane n'est pas possible selon des ententes de Gaz métropolitain pour l'accès à leur réseau. La vente directe, à ces niveaux est peu probable. Au niveau de la vente ou de l'utilisation du biogaz, il semble également peu probable que celle-ci soit entièrement vendue ou utilisée. Ce gaz étant non compressible, une portion considérable du gaz devrait être brûlé par la torchère. Ceci viendrait sensiblement diminuer les niveaux de revenus associés à la vente de gaz ou de biogaz. Malgré les revenus moindres associés à la production d'électricité, notons que celle production engendre par la cogénération la chaleur nécessaire au chauffage des installations. Considérant que l'ensemble de la ressource gaz sert à la production d'électricité, la chaleur nette dégagée vaut près de 3,8 millions de dollars par an. Cet apport via la cogénération n'est pas négligeable.

L'examen du tableau 59 montre que le potentiel de revenu lié à la production d'électricité est de 130 milles dollars par période. Les investissements cumulés sont de l'ordre de 37 millions de dollars. Soustrait des revenus de 97 millions de dollars après 9,5 ans, on remarque que le Bilan 1 équivaut à 59 millions de dollars. Considérant que la digestion anaérobie génère par les coûts évités qu'elle engende, un montant cumulé de près de 92 millions de dollars est fort intéressant. Un bilan 2, après 9,5 ans à 151 millions de dollars \$ permet de visualiser l'apport relatifs aux coûts évités.

Au niveau des investissements, la figure 55 montre l'ajout de six digesteurs successifs et de trois génératrices. Cette fonction permet de montrer le scénario d'investissement si l'achat du système complet n'est pas possible étant donné la taille des investissements à faire.



La figure 58 montre les éléments constitutifs du Bilan I soit, les coûts des équipements, les revenus et les coûts évités. On remarque, sur la figure 59, dans la première section, que les courbes évoluent en « dents de scie ». Ce phénomène s'observe à cause des mécanismes d'ajustement des capacités des digesteurs et des génératrices dans le temps. Notons que les pas sont moins saccadés que dans la figure 55. Cela s'explique notamment au fait que l'ajout de capacité agit non seulement sur les coûts, mais aussi sur les revenus et coûts évités. La seconde section de la figure 59, plus linéaire, s'obtient du fait que les coûts d'investissements plafonnent lorsque le modèle atteint son plein potentiel. La croissance observée est liée aux coûts évités qui s'accumulent malgré des déboursés d'investissements constants observables à la figure 58.

### Scénario B : Électricité

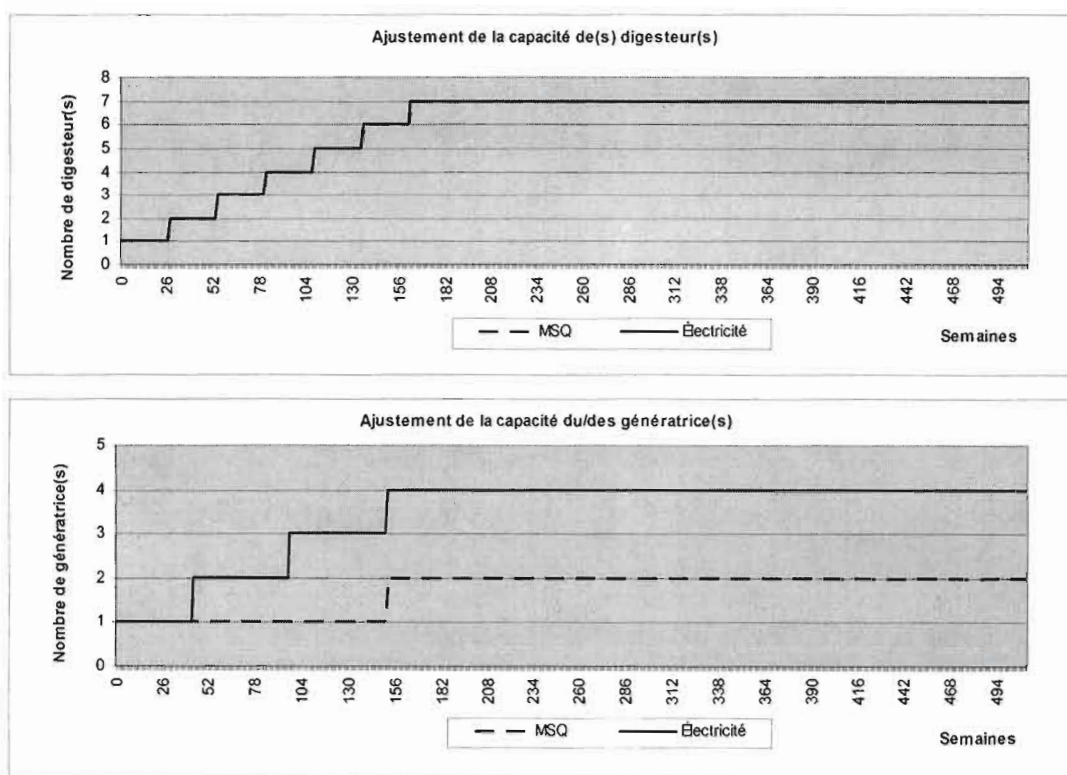
Le côté droit du tableau 59 montre les résultats du scénario intitulé électricité. On remarque que le niveau des intrants du système est égal à celui de la situation MSQ. Les deux modélisations tiennent compte de 100 % des intrants disponibles. Ce scénario permet d'évaluer les coûts relatifs au système complet. On remarque que le bilan 1 atteint le point mort après quatre ans et demi. La simulation N-T, permet de cibler exactement ce seuil. Celui-ci est à la 235<sup>e</sup> période. En fonction de l'ensemble des intrants disponibles, le système compte un maximum de sept digesteurs et de quatre génératrices électriques.

**Tableau 59 - Résultats : Scénario B**

Années		Calibrage					Scénario				
		MSQ					Électricité				
		0	2	4	6	9,5	0	2	4	6	9,5
Intrants	Déjections m3	19 648	19 648	19 668	19 668	19 677	19 648	19 648	19 668	19 668	19 677
	Boues m3	19 706	19 706	19 706	19 706	19 706	19 706	19 706	19 706	19 706	19 706
	MP m3	1 347	5 749	6 265	6 266	6 266	1 347	5 749	6 265	6 266	6 266
Extrants	Compost \$/p.	0	66 834	96 761	96 853	96 900	0	66 834	96 761	96 853	96 900
	Biogaz \$/p	18 400	73 419	106 396	106 396	106 447	0	0	0	0	0
	Gaz naturel \$/p	0	109 201	158 249	158 249	158 324	0	0	0	0	0
	kWh \$/p	0	29 749	43 111	43 111	43 132	0	90 149	130 640	130 640	130 702
Matériels	Digesteur(s) u.	1	4	7	7	7	1	4	7	7	7
	Vol. D m3	3 500	14 000	24 500	24 500	24 500	3 500	14 000	24 500	24 500	24 500
	Génératrice(s) u.	1	1	2	2	2	1	3	4	4	4
	Vol. G kWe	5 000	5 000	10 000	10 000	10 000	5 000	15 000	20 000	20 000	20 000
Économique	Coûts										
	Équipements \$	0	14 457 222	26 674 548	26 674 548	26 674 548	0	25 452 498	37 669 824	37 669 824	37 669 824
	Revenus \$	0	17 004 300	56 656 762	98 735 905	173 200 186	0	9 420 438	31 652 260	55 311 349	97 179 096
	Bilan 1 \$	0	2 547 078	29 982 214	72 061 357	146 525 638	0	(16 032 060)	(6 017 564)	17 641 525	59 509 272
	Coûts évités \$	0	9 399 816	30 457 106	52 585 801	91 745 390	0	9 399 816	30 457 106	52 585 801	91 745 390
	Bilan 2 \$	0	11 946 894	60 439 320	124 647 158	238 271 028	0	(6 632 244)	24 439 541	70 227 325	151 254 662

La figure 55 montre deux graphiques d'ajustement de la capacité des équipements modélisés. L'ajout d'un nouvel équipement se traduit par l'apparition d'un plateau dans la courbe. Comme les deux scénarios comportent les mêmes niveaux d'intrants, l'ajustement de la capacité des digesteurs est la même pour les deux scénarios. Ce qui n'est pas le cas pour les génératrices. La différence observable sur le graphique d'ajustement de la capacité des génératrices vient du fait que la situation MSQ alloue seulement 33 % des gaz produit à la production d'électricité. Les deux autres tiers sont alloués respectivement à la vente de biogaz et la vente de gaz naturel.

**Figure 55 - Scénario B : Ajustement de capacité**



Les figures 56 et 57 présentent quatre graphiques de valeur qui montrent les niveaux par période des valeurs de chacun des extrants. Ces données non cumulatives distinguent les deux scénarios présentés. Alors que les deux courbes de valeur compost sont superposées, on remarque une différence certaine au niveau des trois autres extrants. La courbe de valeur des kWh représente trois fois celle de la situation MSQ et par le même fait est nulle pour la production de biogaz et gaz naturel qui ne font pas partie du scénario électricité.

**Figure 56 - Scénario B : Valeur Compost et kWh**

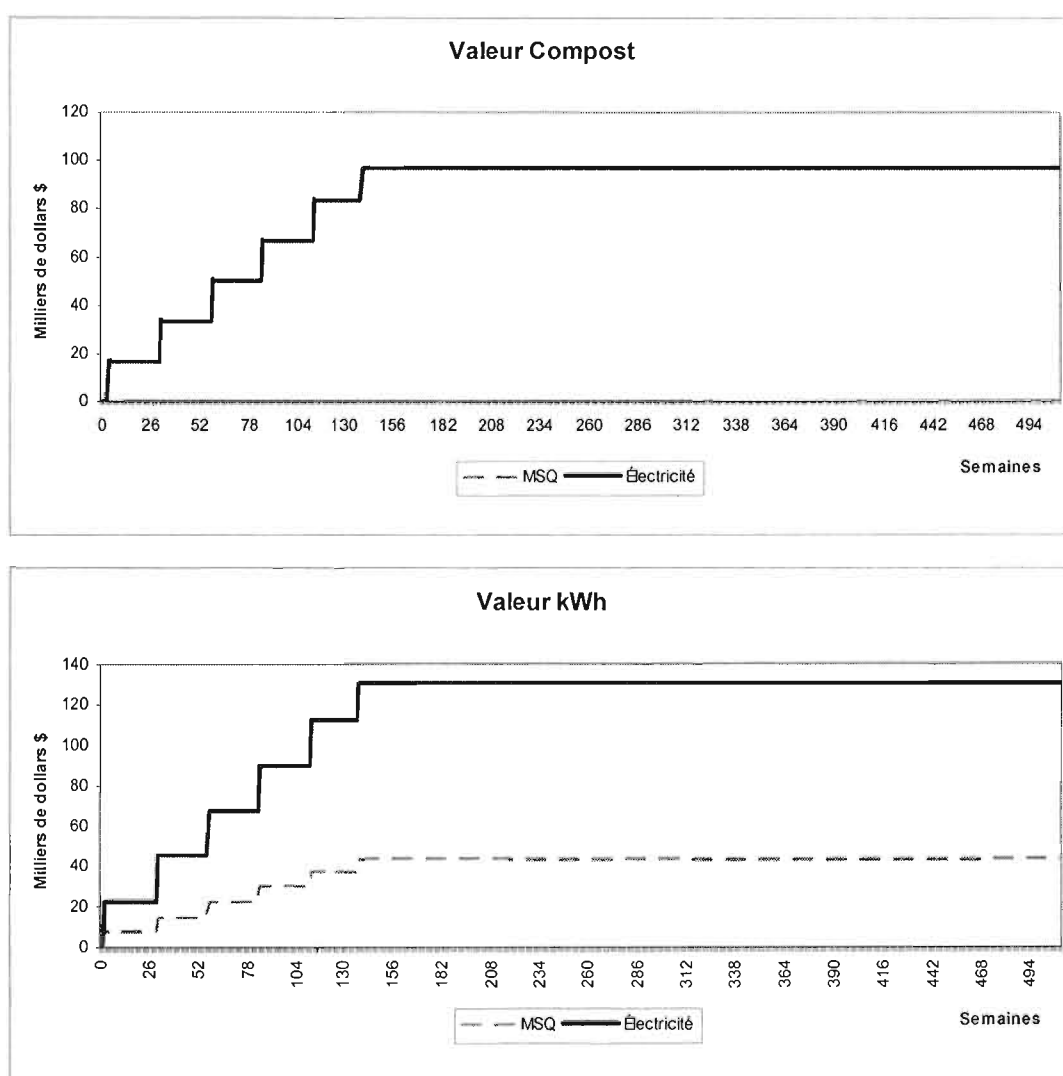
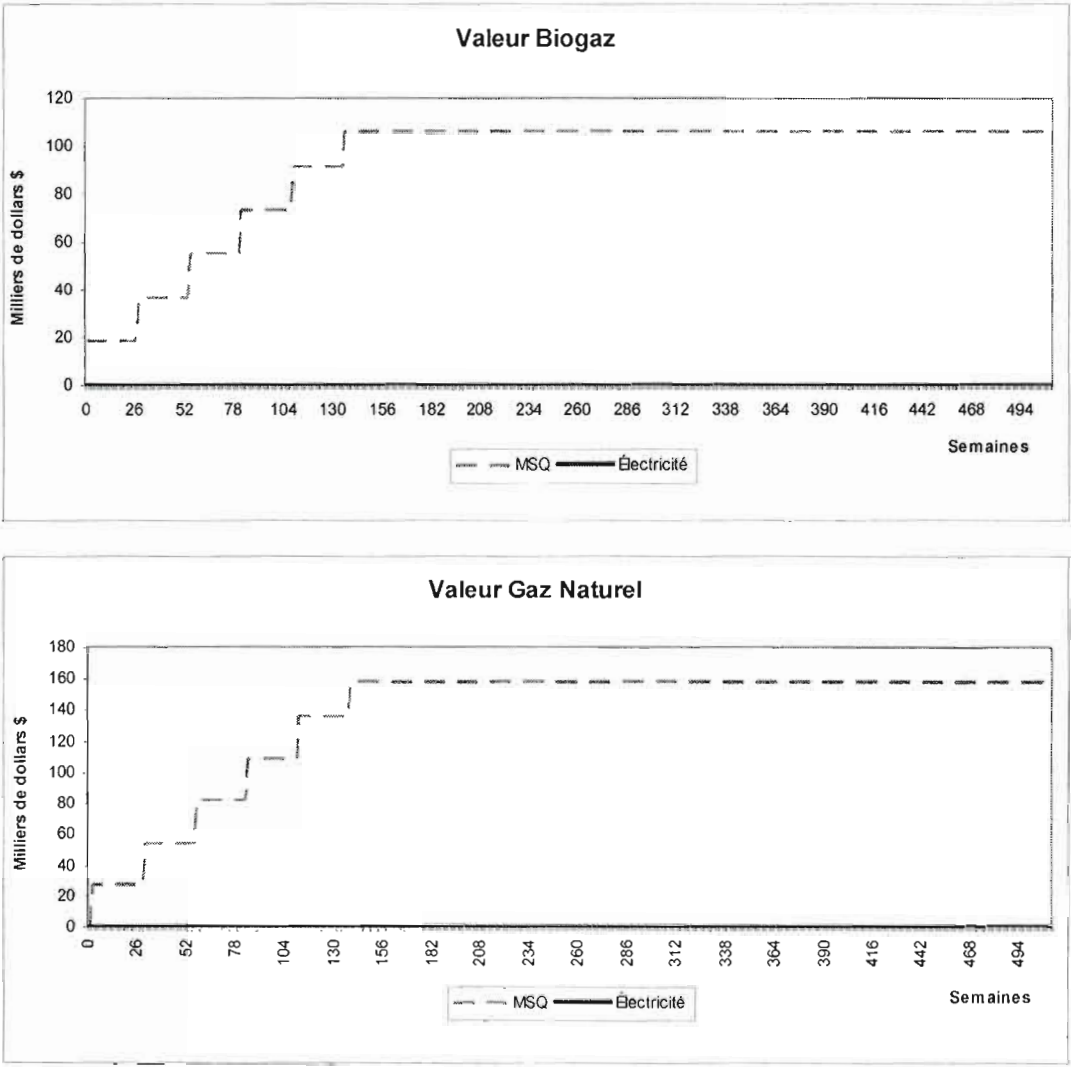
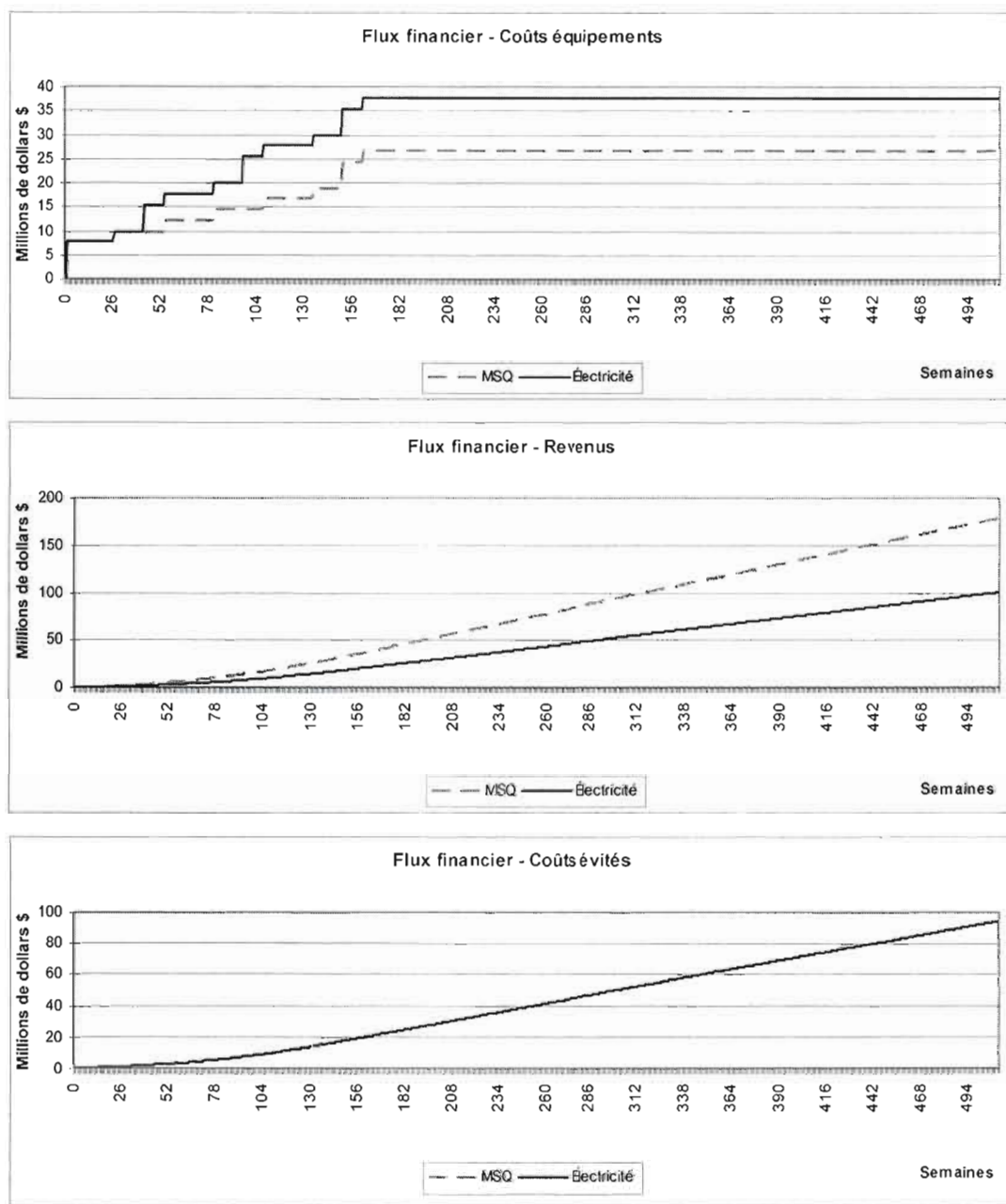


Figure 57 - Scénario B : Valeur Biogaz et Gaz naturel



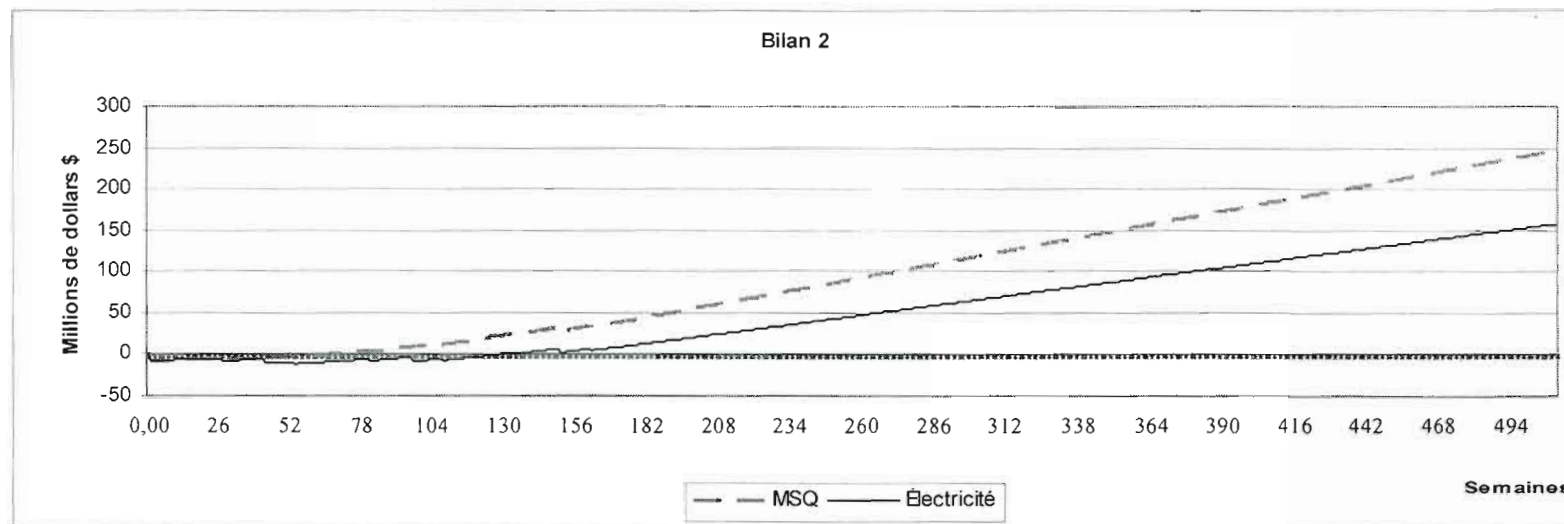
La figure 58 montre trois graphiques liés aux flux financiers. On remarque que les courbes de coûts évités sont superposées. Ceci s'observe puisque le niveau d'intrants valorisé est égal pour les deux scénarios. Au niveau des coûts d'équipement et des revenus, cette situation est différente. La production d'électricité est plus chère et rapporte moins.

**Figure 58 - Scénario B : Flux financiers**



La figure 59 présente le bilan 2. Ce bilan inclut les coûts, les revenus ainsi que les coûts évités suite à la valorisation des MR. Encore une fois, on remarque que le scénario B est moins rentable que la situation MSQ. Cela provient du fait que le modèle ne produit que de l'électricité. On constate que le seuil de rentabilité peut être atteint à l'intérieur de la 2<sup>e</sup> années. Notons que le bilan 1, qui n'inclut pas les coûts évités atteint ce niveau à la 235<sup>e</sup> période, où après quatre ans et demi.

**Figure 59 - Scénario B : Bilan 2**



## 6.5 Retour sur les questions de recherche

Dans l'introduction, une série de questions de recherche principales ont été identifiées afin de circonscrire l'objet d'étude. La présente section représente un retour sur ces questions.

### 6.5.1 Questions de recherche

#### a. Est-ce qu'un projet de digestion anaérobie peut être rentable au Québec ?

Les résultats du modèle de simulation montrent qu'un modèle de digestion anaérobie, tel qu'élaboré dans le cadre de cette recherche, peut être rentable. L'analyse des scénarios A et B montre que considérant la valeur des coûts évités, cette activité est possiblement rentable. La revue des bilans 1 et 2 des figures 58 et 59 démontre ce fait. L'analyse du bilan 1 du scénario A montre qu'un système à petite échelle avec les trois types de valorisation des gaz atteint presque le seuil de la rentabilité après 2 ans. À deux ans, on observe des revenus de près de 8 millions de dollars et des investissements de 10 millions de dollars. Le scénario A montre qu'il pourrait être réalisable de lancer un projet de ce type au Québec.

#### b. Quels sont les facteurs de non-adoption de la digestion anaérobie?

Parmi les facteurs de non-adoption, la recherche montre qu'historiquement les acteurs (producteurs et éleveurs, municipalité et citoyens) ne collaborent pas. Leurs intérêts étant souvent divergents, l'acceptabilité sociale de la production animale représente un enjeu vif dans les villes et MRC. La cohabitation régionale étant un élément de plus en plus important alors que l'étalement urbain amène la ville à la campagne.

La représentation sur papier du modèle ainsi que la création du DI ont permis de montrer au cours des rencontres avec les intervenants, que les acteurs ne partagent pas une vision commune du système. Ce manque de concertation ralentit le processus d'adoption.

Un des facteurs clé identifié montre la difficulté de chiffrer les investissements et les rendements des systèmes de digestion anaérobie. Les consultants et les entreprises, qui



offrent ce type de projet peuvent difficilement présenter des ventilations de coûts exactes. Dans l'incertitude, les administrations municipales et les éleveurs sont peu enclins à investir dans une technologie qui nécessite des investissements massifs.

Autre constatation, il n'existe pas au Québec une installation de taille comparable à celle proposée dans cette étude. Seules deux installations à la ferme existent et utilisent seulement les déjections animales. Leurs petites tailles et le faible potentiel méthanogène des déjections seules rend ces installations peu comparables au modèle étudié. Aucun digesteur de cette envergure n'existe au Québec.

À propos des effluents traités et donc pas nécessairement du compost, le document *Biométhanisation à la ferme* du CRAAQ montre que les effluents traités contiennent sensiblement la même quantité de fertilisants et un volume quasi-équivalent. Dans le cas des effluents traités, on dit que le taux de matière organique est grandement diminué. Ce qui, du point de vue agronomique, n'est pas toujours souhaitable notamment dans le cas de sols légers qui nécessitent cet apport de matières organiques. Notons que les éléments fertilisants deviennent plus biodisponibles après le traitement et que le coefficient au champ est ainsi augmenté. Ce qui réduit davantage la quantité de fertilisants nécessaires (Agri-Réseau, 2008).

Au niveau financier, malgré que la digestion anaérobie soit rentable, notons que le prix de l'énergie au Québec représente un frein majeur à la diffusion de cette innovation.

Le tableau 60 montre, en fourchette de prix, le seuil de rentabilité de la production d'électricité à partir de biogaz, et le prix de vente des kWh produits. On remarque immédiatement que la situation québécoise du prix de l'énergie rend la production d'électricité à partir de biogaz difficilement compétitive.

**Tableau 60 - Prix de vente et coûts productions \$/kWh**

Prix de vente \$/kWh (auto production)		Seuil de rentabilité \$/kWh	
Europe	0.11 – 0.25	CRAAQ (biométhanisation à la ferme)	0.13 – 0.22 <sup>2</sup>
Hydro- Ontario	0.11 – 0.145		
Hydro- Québec	0.035 – 0.068	Résultats de recherche <sup>1</sup>	0.01 - 0.11

<sup>1</sup> Selon le scénario électricité en fonction des seuils de rentabilité des bilans 1 et 2

Source : (Agri-Réseau, 2008)

c. Quels sont les facteurs d'adoption de la digestion anaérobie?

Plusieurs facteurs favorisent l'adoption de la digestion anaérobie. Cette technologie permet de valoriser trois types de matières résiduelles identifiées dans la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008. La digestion anaérobie permet de réduire le volume de déchets à enfouir ou à incinérer. Cette valorisation permet la réduction d'émanations de GES liées à la décomposition des matières organiques en absence d'oxygène.

La digestion anaérobie crée des énergies vertes : biogaz, méthane et électricité. Les résidus de la digestion biogaz et effluents traités sont valorisables et constituent une source potentielle de revenus pour les administrations.

À propos des effluents traités, et donc pas nécessairement du compost, le document *Biométhanisation à la ferme* du CRAAQ, montre que certains éléments comme l'azote et le phosphore sont plus facilement assimilables par les plantes post-digestion. C'est l'augmentation de la biodisponibilité qui tend à diminuer les risques de ruissellement des fertilisants et de la contamination des eaux de surfaces et souterraines.

<sup>2</sup> Programme d'atténuation des GES. (2007). Compte rendu de la journée sur la méthanisation des engrais de ferme, 26 janvier.

On note que le nombre d'agents pathogènes ainsi que les odeurs liées aux lisiers sont grandement diminués. Via la décantation, il est possible d'extraire 50 % du phosphore et 10 % de l'azote à peu de frais (Agri-Réseau, 2008). Ainsi écartés, ces fertilisants pourraient être valorisés via d'autres filières par exemple l'ajout de fertilisants organiques aux fertilisants chimiques issus du pétrole.

En somme, la biométhanisation facilite l'exportation des surplus, réduit les risques de contamination des eaux. Elle permet via la réduction des volumes et des odeurs de déjections une meilleure cohabitation régionale.

Par le compostage des effluents traités, il est possible de réduire le volume des effluents tout en augmentant la teneur en matières organiques. L'utilisation agricole, municipale comme résidentielle du compost représente une valorisation certaine des déchets initialement disposés ou exportés hors MRC.

Au niveau des incitatifs économiques notons que le programme écoÉNERGIE offre un incitatif de 1 cent (1¢) par kWh pour la production d'électricité provenant d'une énergie renouvelable sur des installations dont la puissance minimale est d'un mégawatt.

Via le volet technologie de gestion des surplus, le programme Prime-Vert verse une aide allant jusqu'à 200 000 dollars par exploitation de traitement des fumiers.

Revenu Québec offre un crédit d'impôt pour l'acquisition d'installations de traitement de lisier. Ce crédit correspond à 30 % des frais admissibles jusqu'à concurrence de 200 000 dollars. Selon le CRAAQ : « Une subvention visant la réduction des émissions de gaz à effet de serre devrait être rendue disponible à courte échéance pour les projets permettant de remplacer des sources d'énergie fossile » (Agri-Réseau, 2008, p. 9).

Pour la vente des surplus d'électricité au réseau d'Hydro-Québec, le CRAAQ affirme que :

« (...) un programme de microproduction d'électricité devrait voir le jour au cours de l'année 2008 grâce aux modifications apportées par le projet de loi 52 en décembre 2006 (Loi concernant la mise en œuvre de

la stratégie énergétique du Québec et modifiant diverses dispositions législatives). Les modalités de ce programme devraient être soumises par Hydro-Québec à la Régie de l'énergie dans les premiers mois de l'année 2008<sup>3</sup>, mais cette échéance a été repoussée à une date indéterminée. Il devrait viser les installations produisant plus de 50 KW et permettre le rachat de l'électricité excédentaire à un prix fixé par le distributeur<sup>4</sup>.» (Agri-Réseaux, 2008 p. 9)

Or, il est possible d'agir sur certains paramètres afin d'optimiser la valeur énergétique du biogaz. La valorisation thermique permet d'éliminer la perte provenant de la purification. Il est également possible d'utiliser la chaleur via la cogénération pour chauffer par exemple, hôtel de ville, aréna municipal ou une serre extérieure en culture. L'utilisation de cultures énergétiques représente une avenue possible afin d'augmenter le potentiel méthanogène.

La mise en place d'une structure réglementaire au niveau de la gestion des crédits de carbone permettra dans le futur d'augmenter les revenus liés à la digestion anaérobie ainsi qu'à la valorisation des effluents.

#### d. Comment peut-on influencer l'adoption à l'intérieur du système ?

Dans le but d'influencer l'adoption, lancer un premier projet permettrait de prouver la rentabilité de la technologie au Québec. Dans le cadre d'un projet expérimental ou un partenariat public / privé (PPP), il est impératif de réaliser ce premier projet d'envergure et d'impliquer non seulement le gouvernement, les municipalités, mais aussi les entrepreneurs du Québec.

---

<sup>3</sup> Hydro-Québec. Autoproduction – Option de mesurage net.  
[www.hydroquebec.com/autoproduction/fr/index/html](http://www.hydroquebec.com/autoproduction/fr/index/html)

<sup>4</sup> Laflamme, C.B. 2008. Hydro-Québec, Utilisation de l'énergie du biogaz de ferme. Journée agricole sur le porc. 6 février. Joliette.

Suivant ce premier projet, il faudrait cibler les leaders d'influence et leur communiquer les informations pertinentes à la prise de décisions. Tel que présenté, les acteurs présents au cœur du système ont des préoccupations fort différentes et la conciliation de leurs objectifs, n'est pas impossible. L'exercice de concertation passe nécessairement par le partage commun d'une seule et même vision du système. À ce titre, la représentation initiale ainsi que le DI et les résultats pouvant être produits par le modèle N-T sont des moyens permettant d'atteindre ces objectifs.

Au niveau économique, il existe de multiples façons de stimuler l'adoption de technologie ou le remplacement d'autres. Devenue chef de file en matière de méthanisation, l'Allemagne a instauré des mesures gouvernementales importantes. Elle a, entre autres, favorisé cette forme d'énergie par la mise en place d'une tarification verte dès 1992 et de programmes de subventions à l'investissement (Agri-Réseau, 2008). Plus récemment, en 2004, une prime supplémentaire de 4/100 d'Euro bonifie le tarif avantageux de 10/100 d'Euro lorsque les cultures énergétiques sont utilisées dans les biodigesteurs. Le CRAAQ cite l'exemple suivant face à cette dernière mesure : « Depuis 2005, 98 % de tous les nouveaux digesteurs entrés en activité traitent les effluents d'élevage en codigestion avec des cultures énergétiques produites sur la ferme » (Agri-réseau, 2008).

Le modèle Allemand innove par la prise en charge des résidus organiques. Notons, par contre l'effet secondaire inattendu suivant; « Depuis 2005, toutefois, les cultures énergétiques sont venues remplacer les résidus organiques dans le modèle de codigestion » (Agri-réseau, 2008, p. 8). Le Québec impose, via le PGMR 98-08, la valorisation de la majorité de ces résidus organiques, il faut promouvoir l'utilisation d'abord de résidus organiques puis des cultures énergétiques en contre partie. Il s'agit d'un élément non négligeable que le législateur se doit de considérer.

Les États-Unis ont quant à eux, créé plusieurs mesures incitatives pour favoriser l'adoption. Ces mesures se composent de : subventions, rabais de taxes, prêts à faible taux d'intérêt, etc. (Agri-Réseau, 2008; USEPA<sup>5</sup>).

Au Canada, plusieurs provinces ont adopté des mesures économiques, c'est l'Ontario où l'offre de programmes est la plus élaborée. La province offre des subventions en capital et une tarification incitative pour stimuler la production d'énergie renouvelable.

Le professeur associé Jean-François Léonard (2008) de l'UQAM écrivait dans *Le Devoir* :

« ... les municipalités réclament à l'unanimité le financement par Québec des usines de compostage nécessaires pour commencer enfin à collecter les matières organiques sur tout le territoire et faire en sorte que le Québec atteigne les objectifs de 60 % prévus pour 2008.

... Les solutions les plus appropriées et les plus économiques doivent être rigoureuses sur la santé et la sécurité publique, viser l'équité et impliquer le secteur privé. De plus, il faut absolument mettre sous le même chapeau et le même processus toutes les matières résiduelles produites par les individus et les entreprises.

... Par ailleurs, Québec devra proposer les incitatifs réglementaires nécessaires pour augmenter le recyclage et fournir un cadre financier répondant à la priorité de traiter les matières organiques. Car c'est l'un des moyens majeurs de réduire les quantités de matières enfouies et de redonner à la terre ce qui vient de la terre. Il est donc incontournable que la valorisation organique des matières putrescibles soit mise en place à grande échelle et sa collecte, financée adéquatement. Il n'y a pas, aujourd'hui, d'infrastructures en quantité suffisante pour traiter les quelques millions de tonnes de matières potentiellement valorisables. Il faut donc construire. Et au préalable trouver les terrains... et convaincre des populations d'accueillir ces usines à compost. »

---

<sup>5</sup> U.S. Environmental Protection Agency. Combined heat and power partnership, Funding resources. [www.epa.gov/chp/funding/index.html](http://www.epa.gov/chp/funding/index.html)

### 6.5.2 Pistes de réflexions

Cette section présente certaines réflexions dégagées suite au processus de recherche. Les points suivant ciblent certains mécanismes d'influence présents dans le système.

#### a. Qui sont les acteurs présents dans le système?

Alors que le système initial comptait trois niveaux d'acteurs, l'étude du DI montre qu'il existe en plus du système, un macro et un microenvironnement. L'adoption de cette innovation repose d'abord sur l'implication du politique via des mesures importantes et efficaces à l'adoption telles que des subventions et l'accès à des sources de financement à taux réduits. Dans ce dossier, l'implication du gouvernement provincial est d'une importance capitale. L'intégration du gouvernement du Québec, tant au niveau du politique que par des mesures économiques, représente une condition *sine qua non*. Le rôle de la filière municipale englobant les MRC, n'est pas non plus à négliger. Il est important de cibler l'ensemble des dirigeants du politique en passant par les ministres et députés de chacune des régions. Il s'agit ici du macroenvironnement du système.

Localement, au niveau du microenvironnement, il faut impliquer les leaders d'opinion locaux : préfets, maires, chambre de commerce, organismes de bassin versant, régie des déchets, club de fertilisation et organismes de protection de l'environnement etc. La collaboration de ces leaders d'opinion constitue un poids certain sur l'avancement des dossiers de ce type auprès des autorités en fonction.

Au niveau municipal, une offre d'information complète et juste est importante afin de permettre aux élus d'étayer leurs décisions d'investissement sur des bases solides. Se faisant dans un processus transparent envers les citoyens.

Au niveau des producteurs, leur sensibilisation aux avantages que procure leur participation au système est importante. Tel que mentionné ci-haut, l'implication d'instances supérieures est également nécessaire. Les producteurs agricoles travaillent en collaboration avec diverses

agences, et la participation de celles-ci dans la promotion des nouvelles avenues dans l'agriculture est nécessaire. Ces agences, à vocations diverses sont : l'UPA, les COOP, les associations de producteurs, les meuneries, les clubs de fertilisation etc.

Dans un premier temps, il est important au niveau citoyen, de sensibiliser celui-ci à l'importance de la récupération et de la valorisation des matières organiques. L'introduction de la collecte à trois voies est une première étape dans la conscientisation citoyenne à l'importance de valoriser selon le concept de 3RV-E.

Par son rôle de consommateur, le citoyen influence l'offre de biens et services. Conscientiser la population sur les bienfaits de la digestion anaérobie et la valeur des extrants permet de créer des conditions favorables à l'établissement d'un projet. L'utilisation de la co-génération pour chauffer un aréna local à moindre coût est un exemple d'utilisation des extrants post digestion anaérobie.

La sensibilisation représente un autre moyen couramment utilisé dans le but de modifier les habitudes citoyennes. La participation d'une école, via un micro projet de digestion anaérobie, permet non seulement de démystifier le processus, mais il permet aussi de former la génération de demain aux innovations qui génèrent une énergie renouvelable. Un projet de ce type a été construit sur le site de l'école de Richelieu, situé à Richelieu en Montérégie. Le Centre d'interprétation des énergies nouvelles du parc-école possède divers éléments, dont un toit végétal intégré d'une éolienne, un principe de géothermie pour le chauffage ainsi que des panneaux solaires.

#### b. Quels sont les intérêts respectifs des principaux acteurs du système?

Chacun des intervenants dans le système a des préoccupations différentes. Les paragraphes suivants listent leurs intérêts respectifs.

Dans le cadre de la gestion des matières résiduelles, le gouvernement, via la législation et la création d'une société, influence les institutions municipales.



«La Société québécoise de récupération et de recyclage a été créée en 1990 par le gouvernement du Québec. Le ministre responsable de l'application de la loi constitutive de RECYC-QUÉBEC, la *Loi sur la Société québécoise de récupération et de recyclage* (L.R.Q., c. S-22.01), est le ministre du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. Cette loi précise la mission et les mandats de la Société, aussi appelée RECYC-QUÉBEC ».

Dans le cadre de son mandat et en soutien à la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008*, la mission de RECYC-QUÉBEC s'énonce comme suit :

«RECYC-QUÉBEC oriente, met en œuvre et coordonne des activités visant la mise en valeur des matières résiduelles en assurant la gestion de certains programmes, en développant les connaissances pertinentes et en mobilisant les différents acteurs afin de réduire la génération de matières résiduelles et de diminuer les quantités à éliminer. RECYC-QUÉBEC appuie et reconnaît les efforts des intervenants des différents secteurs et assure le suivi de l'atteinte des objectifs de la *Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008*» (Recyc Québec, 2007).

Notons que la société Recyc-Québec ne possède pas de pouvoirs légaux pour forcer l'application de loi; par exemple, la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles. Alors que l'année 2008 se termine, peu de municipalités ont atteint les objectifs de récupération et de valorisation énoncés dans la Politique. Au niveau de la récupération des matières putrescibles, il n'y a que quelques villes qui ont débuté la cueillette.

Au niveau des éleveurs, les préoccupations sont principalement dirigées sur la gestion des déjections et sur les coûts reliés à cette activité. Actuellement, les producteurs d'animaux doivent acheter ou louer des terres pour épandre les déjections provenant de leur élevage. Parmi les autres solutions de gestion des déjections, notons la méthanisation à la ferme. Basée sur les mêmes principes que ceux de la digestion anaérobie, cette solution nécessite des investissements massifs ainsi que des connaissances importantes pour la gestion du système. Comme les déjections seules ne possèdent pas un potentiel méthanogène important, les rendements pauvres font de cette alternative une solution peu populaire.

La gestion des matières résiduelles incombe au monde municipal. Dans le cadre de leurs activités, ils sont responsables de l'aménagement de sites d'enfouissement et/ou

d'incinération. Les administrations mandatent des firmes pour la récupération et la disposition. Dans le cadre de leurs bilans financiers, les municipalités cherchent à disposer et valoriser les matières résiduelles le plus économiquement possible.

Au niveau citoyen, les résidents désirent une gestion adéquate des déchets tout en tenant compte des nouvelles valeurs environnementales. Durant la dernière décennie, les résidents ont été sensibilisés à l'importance de la récupération des matières recyclables et du principe des 3RV-E. Dans le cadre de la politique de gestion des matières résiduelles 1998-2008, la récupération et la valorisation des matières putrescibles devaient être lancées avant la fin de 2008. Peu connue du côté citoyen, la collecte de la 3<sup>e</sup> voie reste à être démystifiée. Notons que la récupération des matières putrescibles nécessite, comme pour la cueillette des matières recyclables, le changement des comportements des acteurs. Alors que le recyclage nécessite le nettoyage des matières, la collecte des résidus bruns nécessite un nettoyage hebdomadaire du bac brun en période estivale. Les odeurs reliées à ces matières constituent une préoccupation certaine pour les propriétaires. Ainsi, la sensibilisation et l'éducation sur les techniques permettant de réduire les odeurs provenant des bacs ventilés sont particulièrement importantes pour que les citoyens adoptent la collecte à trois voies.

La régie intermunicipale de gestion des déchets de la région Maskoutaine offre les recommandations suivantes pour limiter les odeurs et les mouches à fruits :

- Après chaque collecte, nettoyez le bac avec un jet d'eau;
- Emballer vos résidus de cuisine dans du papier journal;
- Déposer des feuilles de papier journal dans le fond de votre bac brun afin d'absorber les liquides, le cas échéant;
- Si vous ne faites pas l'herbicyclage, tondez votre gazon une ou deux journées avant la collecte;
- Placez les résidus de cuisine le plus rapidement possible dans le bac brun;
- Dans le bac, insérez les résidus de cuisine à travers les résidus de jardin;
- Une fois dans le bac roulant, il est aussi possible de recouvrir les résidus de cuisine d'une couche de terre, de paillis, de bran de scie ou de copeaux de bois (Régie des déchets, 2007).

Cette région a lancé la cueillette à trois voies depuis janvier 2007. Parmi les moyens utilisés pour augmenter la participation citoyenne à la collecte à trois voies, la régie a choisi d'espacer la cueillette des déchets. La régie a également bien publicisé l'arrivée de la nouvelle collecte et sensibilisé les citoyens concernés.

c. Quel est le niveau de compréhension de la problématique des acteurs?

Au niveau de la compréhension de la problématique, notons que les acteurs interagissent rarement ensemble. Les préoccupations des acteurs étant parfois opposées, les acteurs se concentrent sur leurs problématiques respectives, sans envisager le macro environnement dans lequel la problématique se retrouve. Ainsi, chaque acteur tente d'agir sur la solution de sa problématique. Cette gestion en silo restreint les possibilités envisageables. Dans le cas étudié, la synergie entre les acteurs permet de solutionner l'impasse de plusieurs acteurs tout en offrant une solution durable qui répond aux éléments présentés à la figure 2 soit : environnement acceptable, économiquement acceptable et socialement acceptable.

d. Est-ce que les acteurs partagent une vision systémique du problème?

La compréhension du système dans son ensemble est essentielle à une prise de décision concertée et éclairée. La recherche d'une solution économiquement rentable et durable est une préoccupation certaine pour les différents acteurs. En fonction des rencontres effectuées avec les gens du milieu, il appert que les acteurs ne partagent pas une vision systémique du problème.

Notons que les firmes qui offrent des équipements de digestion anaérobie sont incapables de chiffrer les rendements ainsi que les déboursés réels reliés à ce type de projet. Dans le cadre de cette recherche, un modèle de simulation niveaux-taux basé sur un chiffrier développé par l'Institut de recherche d'Hydro-Québec a été élaboré. Le chiffrier MATTEUS, encore non publié représente un élément important sur lesquels il devient possible de modéliser un tels système. La création d'un simulateur simple permet de fournir un outil de décision aux décideurs.

e. La collaboration entre les acteurs est-elle possible?

La cohabitation régionale étant un élément problématique depuis des années, il est certain que la collaboration entre les acteurs nécessite une table de concertation et une certaine ouverture. Au niveau de la MRC étudiée, notons que la cohabitation semble bonne. L'agriculture étant historiquement une activité qui a permis le développement de la région, les citoyens sont conscients de l'importance de ce secteur d'activités.

La région ayant été témoin de la fermeture des Compost du Québec, la présentation d'un projet comportant du compostage doit être soumise avec précaution. Dans le cadre d'un PPP, un projet de digestion anaérobie semble possible.

À l'aide des outils développés, il est possible dans un premier temps de montrer le macroenvironnement. Dans un deuxième temps, de présenter les liens entre les différentes variables du modèle avec le DI et finalement montrer un outil d'aide à la décision capable de simuler un modèle théorique.

## 6.6 Discussions,

Au niveau de la diffusion de l'innovation on remarque que certains éléments constituent des freins certains à l'adoption de cette technologie. L'auteur remarque que les auteurs ne partagent pas une compréhension systémique du système. Le manque d'information et de concertation entre les acteurs a ralenti l'examen d'une solution de gestion des matières résiduelles telle que présentée dans la recherche.

Autre fait intéressant lié à la discussion précédente est que l'historique protagoniste des acteurs nuit à la collaboration. La rentabilité potentielle d'un site de valorisation des matières résiduelles par la digestion anaérobie a été prouvée. Alors que les acteurs ont peu collaboré historiquement, il est possible que l'impasse actuelle de la gestion des déchets permettra de rapprocher les acteurs. Face à la recherche de solutions durables, les investissements sont

souvent considérables comparativement aux solutions du passé; ce qui nécessite la collaboration. La venue de politiques environnementales instaurées par les villes de concert avec les acteurs du milieu et les MRC représente une avenue de collaboration possible.

## 6.7 Conclusion

Ce chapitre composé de deux sections principales a présenté les résultats de la recherche selon deux scénarios étudiés. L'ensemble de ces résultats est présenté à la section 6.4 sous forme de tableaux et de figures. La section 6.5 présente un retour sur les questions de recherches énoncées dans l'introduction de la recherche. La section 6.6 présente les discussions de recherche.

## CONCLUSION

Ce chapitre récapitulatif présente les éléments importants de la recherche. Cette étude portant sur la diffusion de l'innovation, des digesteurs anaérobies au Québec a pour objectif de modéliser les éléments tant qualitatifs que quantitatifs qui entrent en jeu dans l'implémentation d'un système de digestion anaérobie.

Pour ce faire, l'approche de la dynamique des systèmes a été retenue compte tenu de la complexité dynamique de la problématique. L'objet d'étude, l'adoption de la digestion anaérobie pour la valorisation des matières résiduelles, est caractérisée par de multiples interactions dont l'ampleur dépasse la capacité limitée de l'homme. C'est à l'aide de diagrammes d'influences et de la modélisation niveaux-taux que la DS offre une vision novatrice d'aide à la décision.

Dans ce cadre méthodologique, une étude de cas a été menée afin de répondre aux questions de recherche. Celle-ci est basée sur l'adoption potentielle de la digestion anaérobie dans la MRC de la Nouvelle-Beauce. Située dans la région Chaudière-Appalaches, la MRC compte non seulement des résidus putrescibles et des boues à valoriser, mais également des déjections d'animaux. Pôle de la production porcine depuis des années, cette région est en surplus de phosphore. La valorisation des déjections autrement que par l'épandage est une préoccupation importante pour les acteurs de la région.

Trois sections de la revue de la littérature ont présenté les principaux axes abordés dans la recherche. D'abord, la diffusion de l'innovation est présentée. Ensuite, la revue de la littérature aborde l'approche de la dynamique des systèmes et finalement, les législations environnementales relatives à l'étude.

Trois représentations ont été faites du système afin d'étudier l'objet d'étude et de répondre aux questions de recherche. La première représentation, plus intuitive, a permis de cibler les

implications respectives des trois niveaux d'acteurs présents : les producteurs, les municipalités et les citoyens. Le second portrait forme le diagramme d'influence qui permet de visualiser les influences directes et indirectes des divers éléments présents dans le système. Finalement, la modélisation niveaux-taux quantitative a permis de faire quelques simulations de l'étude de cas. L'élaboration du modèle de simulation a été présentée ainsi que son calibrage et son évaluation.

Finalement, l'interprétation des résultats fait partie du retour sur les questions de recherche. La recherche conclut sur certaines recommandations permettant de favoriser l'adoption de la digestion anaérobie pour la valorisation de matières résiduelles.

Dans le cadre de cette recherche, des limites ont été constatées. Principalement axée sur les implications économiques et les contraintes des acteurs, la recherche a peu étudié l'incidence du politique des grands acteurs gouvernementaux et paragouvernementaux.

Dans l'élaboration de l'étude de cas, seules les matières putrescibles provenant de résidents ont été modélisées. Ces MP ainsi que les résidus de construction des secteurs de la construction, rénovation, démolition (CRD) et industriel, commercial et institutionnel (ICI) n'ont pas été inclus dans le modèle, et ce, malgré leur haut potentiel méthanogène.

Les données utilisées dans la création du modèle reposent principalement sur un autre outil de prévision. Quoique bien documentée, l'utilisation de données terrain ou la comparaison pour fin de validation et de calibrage serait souhaitable.

Au niveau des perspectives de recherches futures, notons que l'objet de recherche est particulièrement fertile. La digestion anaérobie au Québec est peu connue et peu documentée. L'enrichissement de la présente recherche est non seulement pertinente, mais s'est intéressante pour la création de nouveaux savoirs. On peut retenir les axes de recherche potentiels suivants.

L'enrichissement du volet portant sur l'évaluation du macroenvironnement est vouable. L'importance du Politique et des rouages présents dans les organisations gouvernementales

et para-gouvernementales affecte, nécessairement selon la DS, de par leurs structures les mécanismes. Il serait intéressant d'ajouter cette dynamique dans le diagramme d'influence.

L'élargissement du modèle, afin d'y inclure les MP et résidus de construction provenant des ICI et CRD, permettrait d'amener la digestion anaérobie à un tout autre niveau. Dans le cadre de la Politique de gestion des matières résiduelles 1998-2008, l'ensemble des secteurs soit résidentiel, ICI et CRD, devait être en mesure de procéder à la valorisation de ces matières résiduelles.

L'ajout de données de terrain ou la modélisation d'un système réel permet d'ajouter une dimension pratique aux études théoriques. Il existe présentement peu de données sur le sujet au Canada et encore moins au Québec.

Finalement, le modèle peut être élargi afin de tenir compte de la récente dynamique provenant des crédits de carbone. La digestion anaérobie dégrade les matières résiduelles en absence d'oxygène, ce qui permet de réduire sensiblement les émissions de GES. L'ajout de cette dynamique amène une nouvelle face à la digestion anaérobie si celle-ci est comparé à d'autres type de valorisation des matières résiduelles. Par exemple, la combustion.



## BIBLIOGRAPHIE

- Allen, P. 1994. Coherence, chaos and evolution in the social context. *Futures* (26):597.
- BeBresson, C. 2004. Des analyses économiques utiles  
Applications contemporaines des tableaux entrées-sorties Dans *Changement climatique, flux technologiques, financiers et commerciaux*, édité par P. d. I. U. d. Québec. Sainte-Foy.
- Bell, James A., and James F. Bell. 1980. System dynamics and scientific method. Dans *Elements of the system dynamics method*, édité par J. Randers. Cambridge: Productivity Press.
- Bergeron, J, -M. 2008. Matières résiduelles: sources de revenus ou dépenses sans fin ? *La Presse*, 2 décembre 2008.
- Braun, W. 2002. The system archetype.26.
- Brodhag, C, and al. 2003. *Dictionnaire du développement durable*: Éditions MultiMondes.
- Chakravorti, B. 2003. *The slow pace of fast change*. Boston: Havard Business School Press.
- Choinière, Y. 2003. Traitement du lisier de porc. À l' *Expo-Congrès du porc du Québec 2003*.
- Cloutier, L.M. 2006. *Notes de cours MBA8F19, ESG-UQAM*.
- CRAAQ. 2003. *Guide de fertilisation*. 1re édition ed. Ste-Foy.
- DeBresson, C., and L. M. Cloutier. 2002. *Changement climatique, flux technologiques, financiers et commerciaux: nouvelles directions d'analyse d'entrée et sortie*. Édité par P. d. I. U. d. Québec. Sainte-foy: Cloutier, L. M., Debresson, C. .
- Durand, R., J.-P. Bonardi, T. Abdessemed, and B. Quélin. 1998. Pour une nouvelle représentation de la compétitivité technologique. *Revue Française de Gestion* Mars-Avril-Mai:30-45.
- Fichman. 2000. The diffusion and assimilation of information technology innovations. Dans *Framing the domains of IT management: projecting the futur...through the past*, édité par P. E. Ressources. Cincinnati.

- Forrester, J. W. 2000. From the ranch to systems dynamics: An autobiography. Dans *Management laureates: A collection of autobiographical essays, Vol. 1*, édité par A. G. Bebeian. Cambridge: JAI Press.
- Gouvernement du Québec. 2000. Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008: Gazette officielle du Québec.
- Gouvernement du Québec. 2006. Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008: bilan intérimaire, édité par MDDEP: Gouvernement du Québec.
- Katz, M. L., and C Shapiro. 1985. Network externalities; competition, and compatibility. *The American Economic Review* 75 (3):424-440.
- Katz, M. L., and C Shapiro. 1986. Technology adoption in the presence of network externalities. *The Journal of Political Economy* 94 (4):822-841.
- Katz, M. L., and C Shapiro. 1994. Systems competition and network effects. *The Journal of Economic perspectives* 8 (2):93-115.
- Laflamme, C.B., MATTEUS 5.9. Institut de recherche d'Hydro-Québec, SHAWINIGAN.
- Laflamme, C.B. MATTEUS version 5. Tome 2 : statistiques et propriété. Shawinigan : Laboratoire des technologies de l'énergie.
- Lavoie, G. 2003. La mouvance du modèle économique, une spirale qui entraîne la filière agroalimentaire À la *Séance publique de la Régie des marchés agricoles et alimentaires du Québec*.
- Lavoie, G. 2007. Rencontre - Portrait de l'industrie porcine au Québec. Longueuil, Août 2007.
- Lehoux, R. 2007. Conférence de Monsieur Richard Lehoux, préfet de la MRC de la Nouvelle-Beauce. Au *Congrès de l'ordre des agronomes du Québec*.
- Léonard, J.-F. 2008. Le Québec et ses déchets - À l'heure des comptes. *Le Devoir*, 23 décembre 2008.
- Liebowitz, S. J., and S. E. Margolis. 1994. Network externality: an uncommon tragedy. *Journal of Economic Perspectives* 8 (2):133-150.
- Liebowitz, S.J., and S.E. Margolis. 1995. Are network externalities a new source of market failure? *Research in Law and Economics* 17:1-22.
- Lord, Carole. 2005. Contribution de la dynamique de système à l'informatisation de tableau de bord prospectif, Informatique de gestion, Université du Québec à Montréal, Montréal.

- Mahajan, V., E. Muller, and F. M. Bass. 1990. New product diffusion models in marketing: a review and directions for research. *Journal of Marketing* 54 (janvier):1-26.
- Mahajan, V., and R. Peterson. 1985. *Models for innovation diffusion*. Beverly Hills, CA: Sage publications.
- Mayrand, Frédéric. 2005. Facteurs critiques de succès des projets de développement logiciel impartis outre-mer : une explication par la dynamique des systèmes, Maîtrise en informatique de gestion, Université du Québec À Montréal, Montréal.
- McBean, G, and C Coleman. 2004. Changements climatiques. In *Changement climatique, flux technologiques, financiers et commerciaux*, édité par P. d. I. U. d. Québec. Sainte-Foy.
- Meadows, Donella H. 1980. The unavoidable a priori. Dans *Element of the system dynamics method*, edited by J. Randers. Cambridge: Productivity Press.
- Page, W. H., and J. E. Lopatka. 2000. Network externalities. Dans *Encyclopedia of law and economics*, édité par B. B. G. D. Geest.
- Parker, P. M. 1994. Aggregate diffusion forecasting models in marketing: a critical review. *International Journal of Forecasting* 10 (2):353-380.
- Pilette, F. 2000. Analyse des scénarios possibles de gestion des matières résiduelles putrescibles de la M.R.C. du Val-Saint-François, Faculté des sciences, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- Poulsen, T. G. 2002. Solid Waste management: Aalborg University.
- Randers, Jorgen. 1980. *Elements of the system dynamics method*. Cambridge: Productivity Press.
- Robert, L, J-N Couture, and A Goudreau. 2007. Des actions pour le présent; Une vision pour l'avenir. Dans *Comité multipartite sur la gestion des fumiers de Chaudière-Appalaches*, édité par MAPAQ.
- Roberts, Nancy, David Andersen, Ralph Deal, Michael Garet, and William Shaffer. 1983. *Introduction to computer simulation*. Don Mills, Ontario: Addison-Wesley.
- Rogers, E. M. 1995. *Diffusion of innovations*. 4<sup>e</sup> ed: Free Press. Édition originale, 1962.
- Rogers, E. M. 2003. *Diffusion of innovations*. 5<sup>e</sup> ed: Free Press. Édition originale, 1983.
- Senge, P. M. 2006. *The fifth discipline*. 2<sup>e</sup> ed. New York: Doubleday. Édition originale, 1990.

- Shapiro, C, and H. R. Varian. 1999. *Économie de l'information*. Traduit par F. Mazerolle, *Ouvertures économiques. Balises*. Paris: De Boeck Université.
- Shapiro, C. , and H. R. Varian. 1999. *Information rules : a strategic guide to network economy*. Boston: Havard Business School Press.
- Shchermerhorn, J., and al. 2006. *Comportement humain et organisation*. 3<sup>e</sup> ed: E.R.P.I. Édition originale, 1994.
- Simon, H. 1957. Principe of bounded rationality.
- Sterman, J. D. 2000. *Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world*. Édité par Irwin/McGraw-Hill. Boston: Shelstad j. j.
- Sterman, J. D. 2001. System dynamics modeling: Tools for learning in a complex world. *California Management Review* 43 (4):8-25.
- Steyer, A., and J. B. Zimmerman. 1998. On the frontier: structural effects in a diffusion model based on influence matrixes. Dans *Local interactions and global effects*, Édité par S. Verlag.
- Teece, D. 1986. Profiting from technological innovation: Implication for integration, collaboration, licensing and public policy. *Research policy* 15.

## BIBLIOGRAPHIE DE SITES INTERNETS

ACNU, 2002, Suivi de l'ONU; l'ONU et les droits de l'homme.

Disponible à : [http://www.unac.org/fr/link\\_learn/monitoring/susdev\\_background\\_brief.asp](http://www.unac.org/fr/link_learn/monitoring/susdev_background_brief.asp)  
visité le 25 janvier 2007.

Agri-Réseau, 2007, Développement du biogaz en Ontario : une vision pour le Québec

Disponible à : <http://www.agrireseau.qc.ca/energie/navigation.aspx?r=biogaz>  
visité le 22 avril 2008

Agri-Réseau, 2008, La biométhanisation à la ferme

Disponible à : <http://www.agrireseau.qc.ca/navigation.aspx?r=biogaz>  
visité le 23 octobre 2008

BioTerre, 2008, Qu'est-ce que la digestion anaérobie?

Disponible à : <http://www.bioterre.com/digestion.php>  
visité le 23 octobre 2008

CMM, 2006, Comparaison des technologies et des scénarios de gestion des matières résiduelles

Disponible à : <http://www.cmm.qc.ca/index.php?id=7>  
visité le 22 juillet 2007.

CRAAQ, n.d., Charges fertilisantes des effluents d'élevage.

Disponible à : <http://www.craaq.qc.ca/Services/Servicesauxintervenants.2/>  
visité le 14 février 2008

FAO, novembre 2006, Agriculture 21; Les impacts de l'élevage sur l'environnement.

Disponible à : <http://www.fao.org/ag/fr/magazine/0612sp1.htm>  
visité le 19 mars 2007.

Financière Agricole Canada, Rapport Valeur des terres agricoles – printemps 2007.

Disponible à : <http://www.fcc-fac.ca/fr/Products/Property/FLV/Spring2007/index.asp#qc>  
Visité le 25 juin 2008.

Financière Agricole Canada, Rapport Valeur des terres agricoles – printemps 2008.

Disponible à : <http://www.fcc-fac.ca/fr/Products/Property/FLV/Spring2008/index.asp#qc>  
Visité le 20 juin 2008.

GIEC, 2006-12-22, Qui sommes-nous?.

Disponible à : <http://www.ipcc.ch/languageportal/frenchportal.htm#1>  
visité le 10 janvier 2007.

Environmental Power, 2007

Disponible à : <http://www.environmentalpower.com/newsroom/>  
visité le 18 avril 2008.

Environnement Canada, 1997-09-09, Historique du protocole de Montréal.

Disponible à : [http://www.ec.gc.ca/press/ozone2\\_b\\_f.htm](http://www.ec.gc.ca/press/ozone2_b_f.htm)  
visité le 11 janvier 2007.

Environnement Canada, 2005-10-05, La science des changements climatiques.

Disponible à : [http://www.ec.gc.ca/climate/overview\\_science-f.html](http://www.ec.gc.ca/climate/overview_science-f.html)  
visité le 17 janvier 2007.

Environnement Canada, 2006-01-27, Protocole sur les substances qui appauvrissent la couche d'ozone (Protocole de Montréal).

Disponible à : [http://www.ec.gc.ca/international/multilat/ozone1\\_f.htm](http://www.ec.gc.ca/international/multilat/ozone1_f.htm)  
visité le 11 janvier 2007.

Financière Agricole, 2007-07-11, Rendement de référence (Probable) 2007,

Disponible à : <http://www.financiereagricole.qc.ca/index.php?id=827>  
visité le 7 mars 2008.

FPPQ, 1994; 2004, Le plan agroenvironnemental,

Disponible à : [http://www.leporcduquebec.qc.ca/fppq/envir-2\\_3.html](http://www.leporcduquebec.qc.ca/fppq/envir-2_3.html)  
visité le 9 mai 2008.

ISQ, 2008-04-26, Boeuf inventaire par région administrative 2007

Disponible à : [http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm\\_finnc/filr\\_bioal/elevage/boeuf/index.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/elevage/boeuf/index.htm)  
visité le 22 mai 2008.

ISQ, 2008-04-26, Mouton inventaire par région administrative 2007

Disponible à : [http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm\\_finnc/filr\\_bioal/elevage/mouton/index.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/elevage/mouton/index.htm)  
visité le 22 mai 2008.

ISQ, 2008-04-26, Porc inventaire par région administrative 2007

Disponible à : [http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm\\_finnc/filr\\_bioal/elevage/porc/index.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/elevage/porc/index.htm)  
visité le 22 mai 2008.

ISQ, 2005-06-23, Boeuf inventaire par région administrative et par MRC 2001-2004

Disponible à : [http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm\\_finnc/filr\\_bioal/elevage/boeuf/index.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/elevage/boeuf/index.htm)  
visité le 22 mai 2008.

ISQ, 2005-06-23, Mouton inventaire par région administrative et par MRC 2001-2004  
 Disponible à :  
[http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm\\_finnc\\_filr\\_bioal/elevage/mouton/index.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc_filr_bioal/elevage/mouton/index.htm)  
 visité le 22 mai 2008.

ISQ, 2005-06-23, Porc inventaire par région administrative et par MRC 2001-2004  
 Disponible à :  
[http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm\\_finnc\\_filr\\_bioal/elevage/porc/index.htm](http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc_filr_bioal/elevage/porc/index.htm)  
 visité le 22 mai 2008.

MAPAQ, 2006-09-20, Recettes monétaires agricoles, 1995-2005,  
 Disponible à : <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/md/statistiques/production>  
 visité le 17 juin 2007.

MAPAQ, 2007-04-17, Nouvelle-Beauce.  
 Disponible à :  
<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Regions/chaudiereappalaches/md/statistiques/>  
 visité le 3 mars 2008.

MDDEP, 2002, Résumé de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles 1998-2008,  
 Disponible à [http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat\\_res/resume/index.htm](http://www.mddep.gouv.qc.ca/matieres/mat_res/resume/index.htm)  
 visité le 18 juillet 2007.

BAPE, 2003-09-15, L'inscription de la production porcine dans le développement durable,  
 Disponible à : [http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/rapports/publications/bape179\\_princ.pdf](http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/rapports/publications/bape179_princ.pdf).  
 visité le 17 juin 2007.

Recyc-Québec, 2007, Bilan 2006 de la gestion des matières résiduelles au Québec,  
 Disponible à :  
<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/rubriques/documentation.asp?idTypeLib=20>  
 visité le 14 mai 2008.

Recyc-Québec, 2007, Bilan 2004 de la gestion des matières résiduelles au Québec,  
 Disponible à :  
<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/rubriques/documentation.asp?idTypeLib=20>  
 visité le 14 mai 2008.

Recyc-Québec, 2007, Bilan 2002 de la gestion des matières résiduelles au Québec,  
 Disponible à :  
<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/rubriques/documentation.asp?idTypeLib=20>  
 visité le 14 mai 2008.

Recyc-Québec, 2007, Mission,  
 Disponible à : <http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/qui-sommes-nous/mission.asp>  
 visité le 28 décembre 2008.

Recyc-Québec, 2008, Mise en œuvre programme de collecte de matières compostable pour la production de compost,

Disponible à :

<http://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/client/fr/rubriques/documentation.asp?idTypeLib=21>

visité le 14 mai 2008.

Régie des déchets, (Régie intermunicipale de gestion des déchets de la région maskoutaine), n.d., Services offerts : Dépliant de la collecte à trois voies

Disponible à : <http://www.regiedesdechets.qc.ca/>

visité le 28 décembre 2008.

Régie des déchets (Régie intermunicipale de gestion des déchets de la région maskoutaine), n.d., Communiqués : Collecte à trois voies en janvier 2007 – Livraison des bacs bruns dès le 25 septembre ! (6 septembre 2006), <http://www.regiedesdechets.qc.ca/>

Disponible à : <http://www.regiedesdechets.qc.ca/>

visité le 28 décembre 2008.

USEPA, 2008, 2007 Update on Anaerobic Digester Systems,

Disponible à : <http://www.epa.gov/agstar/resources.html>

visité le 22 avril 2008.



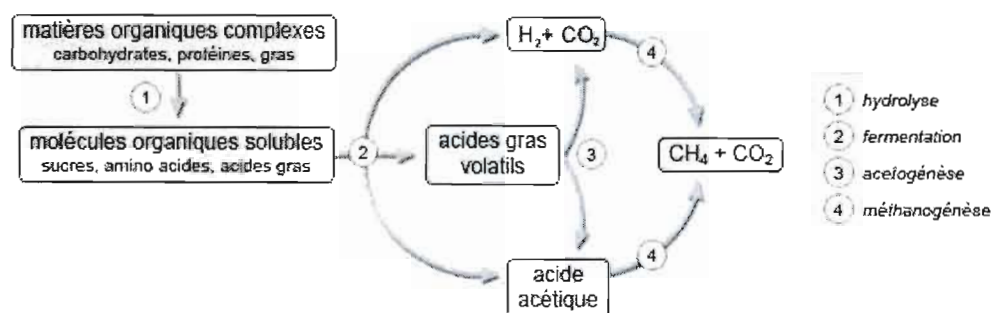
## Annexes

## Annexe 1 - La digestion anaérobie



Qu'est-ce que la digestion anaérobie?

La digestion anaérobie utilise les micro-organismes pour dégrader la matière organique en l'absence d'oxygène.



Le procédé génère du biogaz, qui consiste principalement en du méthane. Le méthane est le même hydrocarbure (CH<sub>4</sub>) que le premier constituant du gaz naturel. Le procédé produit également un liquide, qui contient tous les nutriments du lisier, mais dans des formes plus facilement assimilables biologiquement. La digestion anaérobie peut se faire sous trois plages de température différentes :

- à basse température: psychrophile, 5°C- 25°C;
- à moyenne température: mésophile, 35°C-45°C;
- à haute température: thermophile, 60°C.

Le procédé Bio-Terre fonctionne à des températures non conventionnelles dans la plage psychrophile, variant de 5°C à 25°C. Le procédé utilise des bactéries anaérobies conditionnées pour opérer à basse température pour digérer une variété de substrats organiques, offrant ainsi une solution idéale pour les fermes situées dans un climat froid. Plus de dix années de recherches scientifiques soutiennent la technologie. Ce procédé économique a été développé spécifiquement pour le climat nord-américain et les systèmes de production animale. Chacune des plages de température possède des avantages. À températures élevées, les micro-organismes dégradent rapidement la matière organique, mais le système peut être plus sensible à des changements soudains tels que des variations de température. À basse température, la stabilité du procédé est élevée, mais le procédé requiert un volume de bioréacteur plus grand. Le système de Bio-Terre qui s'opère à basse température fait preuve d'une grande stabilité d'opération même sous des variations importantes de température, de durée des cycles d'alimentation et de taux de chargement organique. La technologie de Bio-Terre réduit les coûts d'opération et améliore la fiabilité comparativement à une digestion anaérobie conventionnelle.

Annexe 2 - 29 actions

Axe d'intervention 1 : Planification de la gestion des matières résiduelles et mobilisation des intervenants			
Thèmes	Actions	État	Commentaires
Planification à l'échelle des municipalités régionales	(1) Élaboration obligatoire de plans de gestion des matières résiduelles par les municipalités régionales de comté, les communautés urbaines ou leurs regroupements.	En voie de réalisation	81 plans de gestion des matières résiduelles (PGMR) adoptés dont 76 en vigueur sur 90 (2 novembre 2006).
	(2) Attribution aux municipalités régionales de comté et aux communautés métropolitaines d'un droit de regard sur la provenance des déchets éliminés sur leur territoire.	Réalisée	Projet de loi 90 (1998) modifiant la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE).
	(19) Élaboration par les municipalités régionales de comté, les communautés urbaines ou leurs regroupements, de plans directeurs de la gestion des boues pour en favoriser la valorisation.	Réalisation partielle	Plans directeurs de gestion des boues partiels et intégrés à une partie seulement des PGMR.
Information, sensibilisation et éducation (ISE) et participation des divers intervenants	(3) Mise en place, par les autorités municipales, de mécanismes de consultation de la population sur l'élaboration et le suivi des plans de gestion des matières résiduelles.	Réalisée	Étape obligatoire d'élaboration des PGMR prévue à la LQE.
	(4) Mise sur pied de comités de vigilance par les exploitants d'installations d'élimination.	En voie de réalisation	En place pour les sites ayant fait l'objet d'autorisations depuis 1993 (établissements ou agrandissements). Prévue dans le cadre du REIMR.
	(5) Mise sur pied d'un programme annuel d'information et d'éducation de 2 M\$ dans le domaine de la mise en valeur des matières résiduelles.	Réalisation partielle	Programme prioritaire seulement – Montant versé : 1 M\$ par le MDDLP et 900 K\$ par RECYC-QUÉBEC.

Axe d'intervention 2 : Réduction des risques de contamination de l'environnement			
Thèmes	Actions	État	Commentaires
Enfouissement des matières résiduelles	(20) Adoption de nouvelles exigences en matière d'enfouissement sanitaire de façon à mieux protéger les personnes et l'environnement.	Réalisée	Adoption du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR)
	(12) Disparition progressive des lieux d'élimination réservés aux matériaux secs.	Réalisée	Adoption du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR)
	(21) Adoption de normes pour régir les dépôts de matériaux secs de façon à protéger la qualité des eaux de surface et souterraines.	Réalisée	Adoption du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR)
	(23) Adoption de nouveaux critères de localisation des dépôts en tranchée afin d'en diminuer le nombre.	Réalisée	Adoption du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR)
	(24) Adoption d'exigences concernant le suivi et la qualité des eaux souterraines et de surface dans les dépôts en tranchée.	Réalisée	Adoption du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR)
	(22) Obligation pour les propriétaires de lieux d'élimination de constituer des fonds de suivi après fermeture.	Réalisation partielle	En place pour les sites ayant fait l'objet d'allocations (depuis 1993 (établissements ou agrandissements) et les nouveaux sites)
Incinération des matières résiduelles	(25) Obligation pour les promoteurs d'un projet d'incinérateur de faire la démonstration que son exploitation ne nuira pas à l'atteinte des objectifs de mise en valeur du territoire concerné.	Non applicable	Aucun projet d'augmentation de capacité d'incinération ou d'établissement d'incinérateur n'a été proposé.
	(26) Adoption de normes plus sévères d'émissions à l'atmosphère pour les incinérateurs.	Réalisée	Adoption du Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles.
Élimination dans le Nord québécois.	(27) Expérimentation d'incinérateurs de faible capacité pour éliminer les déchets dans le Nord québécois.	Non réalisée	Proposition de création de groupes de travail sur la problématique nordique avec les instances concernées.

Axe d'intervention 3 : Récupération et mise en valeur des matières résiduelles			
Thèmes	Actions	État	Commentaires
Objectifs de récupération et de mise en valeur des matières résiduelles	(29) Publication, à tous les deux ans, d'un bilan de la gestion des matières résiduelles au Québec et réévaluation, à tous les cinq ans, des orientations du Plan d'action québécois.	Réalisée	Bilan 2004 a été réalisé et rendu public en septembre 2006; évaluation et bilan intermédiaire de la Politique complété à l'automne 2006 (ci-joint).
Responsabilité élargie des producteurs (REP)	(8) Obligation pour les entreprises concernées à récupérer et à mettre en valeur les emballages et les imprimés à contribuer au financement de la collecte sélective.	Réalisée	Adoption du Règlement sur la compensation pour les services municipaux fournis en vue d'assurer la récupération et la valorisation des matières résiduelles (entrée en vigueur 1 <sup>er</sup> mars 2003).
	(11) Obligation, pour les entreprises concernées, de récupérer et de mettre en valeur les résidus domestiques dangereux.	Réalisation partielle	Responsabilité élargie des producteurs (REP) appliquée aux peintures (2006) et huiles usagées (2004)
	(17) Obligation pour l'industrie de la bière et des boissons gazeuses de financer le système de récupération par coconsignation de leurs contenants à remplissage unique.	Réalisée	Enlèvement de 1999
Matières putrescibles	(9) Récupération obligatoire par les municipalités, aux fins de mise en valeur, des feuilles et des herbes qui ne peuvent être laissées sur place, à compter de l'été 2002.	En suspens	Activité prévue volontairement dans la plupart des PGMR.
	(10) Mise sur pied d'un programme annuel de 3,5 M\$ pour financer des projets de collecte de la matière putrescible.	Réalisation partielle	Programme partiellement seulement – Montant versé 1 M\$
	(6) Mise sur pied d'un programme annuel de soutien à la recherche de 1,5 M\$ dans le domaine de la mise en valeur des matières résiduelles.	Réalisation partielle	Programme partiellement seulement – Montant versé 1 M\$
Soutien au recyclage	(7) Soutien gouvernemental de près de 6 M\$ par année, pendant 5 ans, au démarrage et à la consolidation d'entreprises d'économie sociale opérant dans le domaine de la mise en valeur des matières résiduelles.	Réalisation partielle	Budget total de 22,4 M\$ prévu pour 1999 à 2004. Dépenses réelles de 18,7 M\$, mais aucun projet refusé pour manque de fonds. Depuis avril 2005, nouveau programme sous la responsabilité de RECYC-QUÉBEC.
	(13) Déréglementation de l'utilisation des résidus de béton, d'asphalte et de roque non mélangés pour en favoriser l'utilisation comme matériaux de remblai.	Réalisée	Norme du Bureau de normalisation du Québec (BNCQ)

	(18) Mise en place d'un droit à l'achat de pneus neufs pour assurer le financement du programme de gestion intégrée des pneus hors d'usage	Réalisée	Droit environnemental de 3 \$ sur les pneus neufs de voiture et de camion.
Coordination des activités de mise en valeur	(28) Coordination par RECYC-QUÉBEC des activités de mise en valeur des matières résiduelles pour en assurer l'intégration et la complémentarité	Réalisée	RECYC-QUÉBEC a la responsabilité de gérer divers programmes de financement, d'information, sensibilisation, éducation, de reconnaissance, de gestion de matières résiduelles et de coordination, du suivi des ententes d'agrément et du bilan bi-annuel.

Axe d'intervention 4 : Réduction de la production de matières résiduelles et récupération dans le secteur des ICI			
Thèmes	Actions	État	Commentaires
Modification des modes de production dans le secteur des ICI	(14) Instauration d'un programme d'entente de gestion des déchets menés par les établissements industriels, commerciaux et institutionnels pour la réduction et la mise en valeur de leurs matières résiduelles (audits, politiques environnementales, plans de réduction des résidus) et diffusion publique des résultats obtenus.	Réalisée	Programme de reconnaissance « ICI un recycle » (RECYC-QUÉBEC)
	(16) Poursuite des travaux dans le cadre des initiatives canadiennes en matière d'emballage	Réalisée	Protocole national sur l'emballage (terminé 2000), Groupe de travail du Conseil canadien des ministres de l'Environnement (CCME), début des travaux juillet 2003.
Les pratiques gouvernementales et le développement des marchés	(15) Renforcement de la règle à caractère environnemental de la politique d'achat du gouvernement et intégration de l'utilisation des audits et des plans de réduction des résidus dans la gestion courante des ministères et organismes	Réalisation partielle	Programme « Visez juste » pour les édifices publics (RECYC-QUÉBEC), Adoption de la Loi sur le développement durable, Adoption de la Loi sur les contrats des organismes publics.



### Annexe 3 - Dictionnaire de variables

Nom des variables	Type de variable	Définition	Unité
Biogaz à traiter	Variable de niveau	Niveau du biogaz qui sera traité pour devenir du méthane GT (gaz traité)	m <sup>3</sup> /p.
Biogaz GNT	Variable de niveau	Niveau de biogaz produit	m <sup>3</sup> /p.
Boues	Variable de niveau	Niveau de boues produites	m <sup>3</sup> /p.
Boues à valoriser	Variable de niveau	Niveau de boues qui sera valorisée	m <sup>3</sup>
Capacité D	Variable de niveau	Volume du digesteur (3 500 m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> /u.
Capacité en construction D	Variable de niveau	Niveau représentant la capacité en construction du digesteur	m <sup>3</sup> /p.
Capacité en construction G	Variable de niveau	Niveau représentant la capacité en construction d'une génératrice	kWe/p.
Capacité G	Variable de niveau	Puissance de la génératrice (5 000 kWe)	kWe/u.
CÉ MR V	Variable de niveau	Coûts Évités MR valorisés	\$
CÉ D V	Variable de niveau	Coûts Évités Déjections valorisées	\$
C I D	Variable de niveau	Capacité initiale du digesteur	m <sup>3</sup>
C I G	Variable de niveau	Capacité initiale de la génératrice	m <sup>3</sup> /
Coûts	Variable de niveau	Somme des coûts	\$
DC et MS	Variable de niveau	Niveau de Digesta condensé disponible + matière structurantes	m <sup>3</sup> /p.
Déjections	Variable de niveau	Cumul des déjections (4 types de production)	m <sup>3</sup> /p.
Déjections à valoriser	Variable de niveau	Niveau de déjections destinées à la digestion (valorisation)	m <sup>3</sup> /p.
Digesta	Variable de niveau	Niveau de digesta produit	m <sup>3</sup> /p.
Digesta clarifié	Variable de niveau	Niveau de digesta clarifié produit	m <sup>3</sup> /p.



Digesta condensé	Variable de niveau	Niveau de digesta condensé produit	m <sup>3</sup> /p.
Méthane GT	Variable de niveau	Niveau de méthane produit	m <sup>3</sup> /p.
Matières résiduelles	Variable de niveau	Niveau cumulatif des intrants	m <sup>3</sup> /p.
MP	Variable de niveau	Niveau de matières putrescibles (MP) produit	m <sup>3</sup> /p.
MP à valoriser	Variable de niveau	Niveau de MP destiné à la digestion (valorisation)	m <sup>3</sup> /p.
Revenus	Variable de niveau	Niveau cumulé des revenus des 4 intrants	\$
Capacité exédentaire D	Variable de taux	Taux de sortie qui permet de vider la capacité en construction D lorsque qu'elle atteint le volume d'une unité (digesteur)	-
Capacité exédentaire G	Variable de taux	Taux de sortie qui permet de vider la capacité en construction G lorsque qu'elle atteint le volume d'une unité (génératrice)	-
Mise en opération cap ajouté D	Variable de taux	Taux de sortie qui permet de vider la capacité en construction D lorsque qu'elle atteint le volume d'une unité (digesteur)	-
Mise en opération cap ajouté G	Variable de taux	Taux de sortie qui permet de vider la capacité en construction G lorsque qu'elle atteint le volume d'une unité (génératrice)	-
MR en traitement	Variable de taux	Taux d'entrée des intrants dans le digesteur	-
Taux GT PkWh	Variable de taux	Taux de Gaz traité qui est destiné à la production d'électricité	-
Taux élimination Boues	Variable de taux	Taux de sortie des boues destiné à l'élimination	-
Taux élimination MP	Variable de taux	Taux de sortie des MP destiné à l'élimination	-
Taux ajout capacité D	Variable de taux	Mécanisme d'ajustement de la capacité D	-
Taux ajout capacité G	Variable de taux	Mécanisme d'ajustement de la capacité G	-
Taux ajust capacité D	Variable de taux	Mécanisme d'ajustement de la capacité D	-
Taux ajust capacité G	Variable de taux	Mécanisme d'ajustement de la capacité G	-
Taux ajustement Digesta	Variable de taux	Taux d'entrée du digesta dans la filière compostage	-
Taux coûts	Variable de taux	Taux de calculs des coûts des équipements (digesteurs et génératrices)	-
Taux concentration	Variable de taux	Taux d'entrée du digesta clarifié post clarification	-
Taux conversion Compost	Variable de taux	Taux d'entrée du DC MS post retrait du Facteur compost disposition	-
Taux Déjections valorisées	Variable de taux	Taux d'entrée de coûts évités agricoles provenant de Taux valorisation Déjections	-
Taux déshydratation	Variable de taux	Taux d'entrée de Digesta condensé post déshydratation	-
Taux disposition Compost	Variable de taux	Taux de digesta condensé destiné à la disposition	-

Taux effluents liquides C	Variable de taux	Taux de sortie de Digesta post clarification (sortie des liquides)	-
Taux effluents liquides D	Variable de taux	Taux de sortie de Digesta clarifié post déshydratation (sortie des liquides)	-
Taux exportation hors MRC	Variable de taux	Taux de sortie de déjections qui est destiné à être épandue hors MRC (surplus en fonction de la capacité ou capacité allocateur)	-
Taux facteur ajustement Biogaz	Variable de taux	Taux d'entrée du Facteur ajustement Biogaz dans :	-
Taux prod kWh	Variable de taux	Taux perte Gaz, Taux traitement Gaz et Taux utilisation vente GNT	-
Taux Méthane	Variable de taux	Taux production d'électricité	-
Taux matières structurantes	Variable de taux	Taux production de méthane	-
		Taux d'entrée des matières structurantes dans DC MS pour compostage	-
Taux MR valorisés	Variable de taux	Taux d'entrée de Coputs évités municipal provenant de Taux valorisation MP et Taux conversion compost et de son facteur de mise à l'échelle	-
Taux perte compostage	Variable de taux	Taux de sortie du compost qui représente les pertes lié au compostage	-
Taux perte Gaz	Variable de taux	Taux de sortie issue du taux rejet gaz destiné à brûler (torchère)	-
Taux perte purification	Variable de taux	Taux de biogaz à traité qui est éliminé par le processus de purification (éléments corrisifs présent dans le biogaz)	-
Taux production bestiaux	Variable de taux	Taux d'entrée des déjections provenant des inventaires et des déjections par animal et du facteur de croissance de l'élevage	-
Taux production Boues	Variable de taux	Taux d'entrée des boues dans le modèle	-
Taux production MP	Variable de taux	Taux d'entrée des MP dans le modèle	-
Taux récupération Boues	Variable de taux	Taux d'entrée des boues à valoriser provenant des boues récupérées	-
Taux récupération MP	Variable de taux	Taux d'entrée des MP à valoriser provenant des MP récupérées	-
Taux rejet Digesta	Variable de taux	Taux de sortie des MR représentant la portion liquide des extrants	-
Taux rejet Gaz	Variable de taux	Taux de sortie des MR représentant la portion gazeuse des extrants	-
Taux revenus	Variable de taux	Taux cumulatifs (revenus) des Valeurs kWh, Gaz, Biogaz, Compost	-
Taux traitement Gaz	Variable de taux	Taux d'entrée de Biogaz à traiter provenant de taux rejet Gaz et du Taux facteur ajustement Biogaz	-
Taux utilisation agronomique déj	Variable de taux	Taux de sortie des déjections qui est destiné à l'usage agronomique à l'intérieur de la MRC	-
Taux utilisation vente GAZ	Variable de taux	Taux de sortie du méthane qui est destiné à être utilisé ou vendu	-
Taux utilisation vente GNT	Variable de taux	Taux provenant de taux de rejet de gaz qui est destiné à être utilisé ou vendu sans traitement (Biogaz)	-

Taux valorisation autre Boues	Variable de taux	Taux de sortie de Boues à valoriser qui est destiné à une valorisation autre que la digestion anaérobie (surplus en fonction de la capacité ou capacité allocateur)	-
Taux valorisation autre MP	Variable de taux	Taux de sortie des MP à valoriser qui est destiné à une valorisation autre que la digestion anaérobique (surplus en fonction de la capacité ou capacité allocateur)	-
Taux valorisation Boues	Variable de taux	Taux de sortie des Boues à valoriser qui se destine à la digestion anaérobie	-
Taux valorisation compost	Variable de taux	Taux de production de compost et de valorisation par utilisation (citoyenne, municipale ou agricole)	-
Taux valorisation Déjections	Variable de taux	Taux de sortie des Déjections à valoriser qui se destine à la digestion (valorisation)	-
Taux valorisation exportation déj	Variable de taux	Taux d'entrée des Déjections à valoriser non utilisé (utilisation agronomique)	-
Taux valorisation MP	Variable de taux	Taux de sortie des MP à valoriser qui se destine à la digestion (valorisation)	-
T S CID	Variable de taux	Taux de sortie de la capacité initiale du digesteur	m <sup>3</sup> /p.
T S CIG	Variable de taux	Taux de sortie de la capacité initiale de la génératrice	m <sup>3</sup> /p.
Besoin récup MP	Variable auxiliaire	Existe pour simuler un cas où un le besoin n'égale pas l'objectif.	%
Bilan 1	Variable auxiliaire	Revenus moins les coûts	\$/p.
Bilan 2	Variable auxiliaire	Total cumulatis des coûts, des revenus et coûts évités	\$/p.
Capacité allocateur	Variable auxiliaire	Variable qui détermine le mélange d'intrants à l'équilibre du modèle sous forme d'un ratio ( % déjections, % de MP, % de Boues)	%
Coûts évités	Variable auxiliaire	Cumuls des coûts évités : CÉ MR V et CÉ D V	\$/m3
Norme P2O5	Variable auxiliaire avec délais	Taux d'utilisation de phosphore à l'intérieur de la MRC en fonction de la norme phosphore de 2005, 2008, 2010	m <sup>3</sup> /p.
Objectif ajout capacité D	Variable auxiliaire	Mécanisme d'ajout de capacité D	m <sup>3</sup> /p.
Objectif ajout capacité G	Variable auxiliaire	Mécanisme d'ajout de capacité G	kWe/p.
Total à valo	Variable auxiliaire	Taux cumulatif des intrants à valoriser: Déjections, Boues et MP	m <sup>3</sup> /p.
Totals cumuls	Variable auxiliaire	Total cumulatis des coûts, des revenus et coûts évités	\$/p.
Total Gr élec	Variable	Cumul des kWe disponible pour la génératrice	kWe/p

	auxiliaire		
	Variable		
Valeur Biogaz	auxiliaire	Calcule la valeur du biogaz produit	\$/s.
	Variable		
Valeur Compost	auxiliaire	Calcule la valeur du compost produit	\$/s.
	Variable		
Valeur Gaz	auxiliaire	Calcule la valeur du gaz produit	\$/s.
	Variable		
Valeur kWh	auxiliaire	Calcule la valeur de kWh produit	\$/s.
Besoin agronomique MRC	Constante	Donnée représentant le besoin de phosphore des grandes cultures de la MRC	m <sup>3</sup> /p.
Capacité ajout par digesteur	Constante	Donnée représentant la capacité d'un digesteur	m <sup>3</sup>
Capacité ajout par génératrice	Constante	Donnée représentant la puissance d'une génératrice	kWe
Capacité aug anticipé D	Constante	Volume du digesteur ajouté (3 500 m <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup> /p.
Capacité aug anticipé G	Constante	Capacité de la génératrice ajouté (5000 kWe)	kWe/p.
Coûts Disposition	Constante	Coûts d'éliminations (sans collecte ni transport) quote-part MRC incluse	\$
Coûts épandage 50	Constante	Coûts du transport sur 50 km et d'épandage de lisier	\$/m <sup>3</sup>
Coûts épandage 80	Constante	Coûts du transport sur 80 km et d'épandage de lisier	\$/m <sup>3</sup>
Déjections par animal (bovins)	Constante	Déjections par bovin pour 1 semaine	m <sup>3</sup> /p.
Déjections par animal (porcs)	Constante	Déjections par porc pour 1 semaine	m <sup>3</sup> /p.
Déjections par animal (volaille)	Constante	Déjections par volaille pour 1 semaine	m <sup>3</sup> /p.
Déjections par animal (ovins)	Constante	Déjections par agneau pour 1 semaine	m <sup>3</sup> /p.
Délais ajust capacité D	Constante	Nombre de périodes nécessaire à l'ajout d'un digesteur	p.
Délais ajust capacité G	Constante	Nombre de périodes nécessaire à l'ajout d'une génératrice	p.
Facteur épandage	Constante	Pourcentage des Déjections épandues à 50 et 80 km	%
Facteur ajustement désydratation	Constante	Facteur d'ajustement qui permet de modifier les limites du logiciel de simulation quant à la conservation des flux au niveau du Taux désydratation	%
Facteur ajustement Biogaz	Constante	Facteur d'ajustement qui permet de modifier les limites du logiciel de simulation quant à la conservation des flux au niveau du Taux facteur d'ajustement Biogaz	%
Facteur ajustement Digesta	Constante	Facteur d'ajustement qui permet de modifier les limites du logiciel de simulation quant à la conservation des flux au niveau du Taux ajustement digesta	%

Facteur Biogaz Digesta	Constante	Ratio de production de gaz provenant de la digestion des matières résiduelles le reste (1-Facteur) compose le Digesta	%
Facteur clarification	Constante	Ratio d'effluents liquides C présent dans le Digesta le reste (1-Facteur) forme le digesta clarifié	%
Facteur compost disposition	Constante	Ratio de Digesta condensé qui sera valorisé par le compostage le reste (1-Facteur) forme DC MS	%
Facteur compostage	Constante	Ratio de compost provenand DC MS le reste (1-Facteur) forme le Taux perte compostage	%
Facteur conversion J GJ	Constante	Facteur de conversion des joules en gigajoules (J GJ)	%
Facteur correction densité	Constante	Facteur d'ajustement qui permet de modifier les limites du logiciel de simulation quant à la conservation des flux au niveau du Taux ajustement Digesta	%
Facteur déshydratation	Constante	Ratio d'effluents liquides D présent dans le Digesta clarifié le reste (1-Facteur) forme le Digesta condensé	%
Facteur kWe D I	Constante	Facteur de mise à l'échelle entre les kWh Disponible versus Installé cela représente la portion non utilisé (kWh) des kWh produits	%
Facteur m3 kWe	Constante	Facteur de conversion des m <sup>3</sup> de Gaz en kW électrique	kWe/m <sup>3</sup>
Facteur matières structurantes	Constante	Ratio de matières structurantes à ajouter lors du compostage	%
Facteur perte purification	Constante	Ratio d'éléments corrosifs présents dans le Biogaz le reste (1-Facteur) forme le Méthane GT (gaz purifié)	%
Facteur traitement Gaz	Constante	Ratio du biogaz qui est purifié; le reste (1-Facteur) est le biogaz qui n'est pas traité	%
Facteur utilisation torchère	Constante	Ratio du biogaz qui sera brûlé dans la torchère en cas de surplus, de bris ou d'entretiens des équipements	%
Facteur UV PkWh	Constante	Ratio du méthane qui sera Utilisé ou Vendu (UV) sous forme de Gaz (méthane); le reste (1-Facteur) sera utilisé pour la production d'électricité (PkWh)	%
FER - boues	Constante	Ratio des boues qui est destiné à l'Élimination versus Récupération (ER); Le reste (1-Facteur) forme les boues à valoriser	%
FER - MP	Constante	Ratio des MP qui est destiné à l'Élimination versus Récupération (ER); Le reste (1-Facteur) forme les MP à valoriser	%
MR valo ratio	Constante	Ratios des trois intrants du système	%
Objectif récup MP	Constante	Objectif de récupération et valorisation des MP	%
Prix Biogaz	Constante	Prix du Biogaz (Estimation à 60 % du prix du Gaz naturel)	\$/GJ
Prix Compost	Constante	Prix du Compost	\$/t.
Prix Digesteur	Constante	Prix d'achat et installation fonction du facteur de mise à l'échelle de MATTEUS	\$/u.
Prix Génératrice	Constante	Prix d'achat et installation fonction du facteur de mise à l'échelle de MATTEUS	\$/u.

Prix Gaz	Constante	Prix de l'électricité (appel d'offre éolienne)	\$/kWh
Prix KWh	Constante	Prix du Gaz naturel (commercial)	\$/GJ
Production Boues	Constante	Production des boues: d'usine d'épuration, industrielles et de fosses septiques	m <sup>3</sup>
Production MP	Constante	Production des Matières Putrescibles: résidus alimentaire, verts, matières inertes	m <sup>3</sup>
Taux conversion t m3	Constante	Taux pour convertir les m3 en t	m <sup>3</sup> /t
Inventaire (bovins)	Variable	Dénombrement du nombre de bovin à une date fixe	animal
Inventaire (porcs)	Variable	Dénombrement du nombre de porc à une date fixe	animal
Inventaire (volaille)	Variable	Dénombrement du nombre de volaille à une date fixe	animal
Inventaire (ovins)	Variable	Dénombrement du nombre d'agneau à une date fixe	animal

# Annexe 4 - Modèle niveaux-taux

